

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Frekvenční charakteristiky vstupní impedance
Frequency Input Impedance Characteristics

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Šimíček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Frekvenční charakteristiky vstupní impedance
Frequency Input Impedance Characteristics

Zásady pro vypracování:

Při návrhu přenosové trasy se vychází z topologie sítě, přenosových technologií a typu použitého přenosového média. Důležitým elektrickým parametrem pro přizpůsobení jednotlivých částí je vstupní impedance vedení. Cílem bakalářské práce je vytvoření programu pro výpočet frekvenční charakteristiky vstupní impedance vedení a jeho experimentální ověření.

Práce bude obsahovat:

1. Teoretický úvod s uvedením vlivu primárních parametrů vedení na vstupní impedanci vedení.
2. Sestavení matematického modelu pro výpočet frekvenční charakteristiky vstupní impedance při parametrech zatěžovací impedance, délky vedení a typu použitého média.
3. Vytvoření algoritmu matematického modelu a jeho programová realizace.
4. Porovnání výsledků z matematického modelu s naměřenými průběhy pro reálná média.

Seznam doporučené odborné literatury:

SVOBODA, Jaroslav, ŠIMÁK, Boris, ZEMAN, Tomáš. *Základy teleinformatiky*. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 192 s. ČVUT. ISBN 80-01-01767-2.

SVOBODA, Jaroslav, et al. *Telekomunikační technika - díl 1. : Zprávy, signály, přenosová prostředí*. 1. vyd. Praha : Hüthig, Beneš, 1998. 136 s. ISBN 80-901936-3-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Iva Petříková**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 2. 8. 2012

Šimůnek

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Ivě Petříkové za odbornou pomoc při sestavování matematického modelu a konzultace při vytváření této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům, za jejich podporu během mého studia a jejich trpělivost.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá přenosovými parametry telekomunikačního vedení, které mají vliv na kvalitu přenášeného signálu. Mezi tyto parametry patří vstupní impedance, která je důležitá pro přizpůsobení jednotlivých částí vedení. Cílem této bakalářské práce je vytvoření matematického modelu vstupní impedance, jeho programová realizace a ověření na reálném médiu. Práce se nejprve zabývá homogenním vedením s rozloženými parametry, jeho vlastnostmi a vstupní impedancí v závislosti na zakončení vedení. Poté je uvedeno sestavení matematického modelu pro výpočet vstupní impedance a jeho následná programová realizace. Poslední části se zabývají měřením na reálném médiu a porovnáním hodnot vypočtené vstupní impedance s vstupní impedancí určenou pomocí měření.

Klíčová slova

homogenní vedení, obvod s přizpůsobenými parametry, primární parametry, vlnová impedance, měrná míra přenosu, vstupní impedance, programovací jazyk Java

Abstrakt

This thesis deals with the management of telecommunications line transmission parameters that affect the quality of the transmitted signal. These parameters include the input impedance, which is important for adaptation to different parts of the line. The aim of this thesis is to create a mathematical model of the input impedance, its implementation to program and verify on the real medium. The thesis first of all consider homogeneous management with distributed parameters, its properties and input impedance depending on the end of line. Then is shown build of mathematical model for calculating the input impedance and its subsequent program implementation. The last part is concerned with measurements on real-media and comparing the calculated values of the input impedance of the input impedance determined by measurement.

Klíčová slova

homogeneous lines, circuit with adapted parameters, the primary parameters, wave impedance, specific transmission rate, input impedance, Java programming language

Seznam použitých veličin, symbolů a zkratek

argument měrné míry přenosu	φ_γ	[°]
délka vedení	l	[km]
délka vlny	λ	[km]
efektivní dílčí kapacita	$C_{ac}, C_{ad}, C_{bc}, C_{bd}, C_{ab}$	[nF]
element vedení	dx	
fáze vlnové impedance	φ_0	[°]
fázová rychlost šíření	v_f	[km·s ⁻¹]
frekvence	f	[Hz]
impedance zátěže	\bar{Z}	[Ω]
impedance zátěže vedení naprázdno	\bar{Z}_{20}	[Ω]
konec vedení	a_2, b_2	
měrná indukčnost	L	[mH·km ⁻¹]
měrná kapacita	C	[nF·km ⁻¹]
měrná míra přenosu	$\bar{\gamma}$	[km ⁻¹]
měrný fázový posuv	β	[rad·km ⁻¹]
měrný odpor	R	[Ω·km ⁻¹]
měrný odpor vodiče	ρ	[mm ² ·m ⁻¹]
měrný svod	G	[μS ·km ⁻¹]
měrný útlum	α	[dB·km ⁻¹] [Np·km ⁻¹]
napětí	U	[V]
napětí v místě x	\bar{U}_x	[V]
napětíová úroveň na začátku vedení	L_l	[dBu]
odpor smyčky	R_{ab}, R_{cd}	[Ω]
perioda	T	[s]
podélná impedance	\bar{z}	[Ω·km ⁻¹]
proud	I	[A]
proud v místě x	\bar{I}_x	[A]
průměrná efektivní dílčí kapacita	C_s	[nF]
průměrný odpor smyčky	R_s	[Ω]

průřez vodiče	S	$[\text{mm}^2]$
příčná admitance	\bar{y}	$[\text{S} \cdot \text{km}^{-1}]$
rychlost šíření vln	v	$[\text{m/s}]$
skupinová rychlost šíření	v_{sk}	$[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$
úbytek napětí	$-d\bar{U}_x$	$[\text{V}]$
úbytek proudu	$-d\bar{I}_x$	$[\text{A}]$
úhlová rychlost	ω	$[\text{rad/s}]$
vlnová impedance	\bar{Z}_0	$[\Omega]$
vlnový útlum	A	$[\text{dB}] [\text{Np}]$
vnitřní napětí	U_i	$[\text{V}]$
vnitřní odpor generátoru	R_i	$[\Omega]$
vstupní impedance	\bar{Z}_1	$[\Omega]$
vstupní impedance nakrátko	\bar{Z}_{1k}	$[\Omega]$
vstupní impedance naprázdno	\bar{Z}_{10}	$[\Omega]$
vstupní impedance nekonečného vedení	$\bar{Z}_{1\infty}$	$[\Omega]$
vstupní napětí	\bar{U}_1	$[\text{V}]$
vstupní napětí vedení nakrátko	\bar{U}_{1k}	$[\text{V}]$
vstupní napětí vedení naprázdno	\bar{U}_{10}	$[\text{V}]$
vstupní proud	\bar{I}_1	$[\text{A}]$
vstupní proud vedení nakrátko	\bar{I}_{1k}	$[\text{A}]$
vstupní proud vedení naprázdno	\bar{I}_{10}	$[\text{A}]$
výstupní napětí	\bar{U}_2	$[\text{V}]$
výstupní napětí vedení nakrátko	\bar{U}_{2k}	$[\text{V}]$
výstupní napětí vedení naprázdno	\bar{U}_{20}	$[\text{V}]$
výstupní proud	\bar{I}_2	$[\text{A}]$
výstupní proud vedení nakrátko	\bar{I}_{2k}	$[\text{A}]$
výstupní proud vedení naprázdno	\bar{I}_{20}	$[\text{A}]$
začátek vedení	a_l, b_l	

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Obvod s rozloženými parametry	2
Obr. 2.2: Náhradní schéma elementu dlouhého vedení	2
Obr. 2.3: Frekvenční závislost primárních parametrů	3
Obr. 2.4: Závislost C , S , $\cosh A$, $\sinh A$ na vlnovém útlumu[3]	7
Obr. 3.1: Vlnová impedance kabelu TCEPKPFLE	12
Obr. 3.2: Vlnová impedance kabelu SYKFY	12
Obr. 3.3: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	18
Obr. 3.4: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km	18
Obr. 3.5: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km	19
Obr. 3.6: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km	19
Obr. 3.7: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu SYKFY	20
Obr. 3.8: Průběh vstupní impedance v závislosti na délce l při zátěži $Z = 600\Omega$	21
Obr. 3.9: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	23
Obr. 3.10: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km	23
Obr. 3.11: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km	24
Obr. 3.12: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km	24
Obr. 3.13: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu SYKFY	25
Obr. 3.14: Program na výpočet vstupní impedance	27
Obr. 3.15: Grafický výstup vstupní impedance	27
Obr. 4.1: Schéma zapojení A a B	28
Obr. 4.2: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	30
Obr. 4.3: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km	31
Obr. 4.4: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km	31
Obr. 4.5: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km	32
Obr. 4.6: Průběh vstupní impedance kabelu SYKFY	32
Obr. 5.1: Porovnání vstupní impedance při $Z = 600\Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	34
Obr. 5.2: Porovnání vstupní impedance při $Z = 400\Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	34

Obr. 5.3: Porovnání vstupní impedance při $Z = 150 \, \Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km.....	35
Obr. 5.4: Porovnání vstupní impedance při $Z = \infty \, \Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km.....	35
Obr. 5.5: Porovnání vstupní impedance při $Z = 0$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km.....	36
Obr. 5.6: Porovnání vstupní impedance při $Z = 600 \, \Omega$ kabelu SYKFY.....	36
Obr. 5.7: Porovnání vstupní impedance při $Z = 400 \, \Omega$ kabelu SYKFY.....	37
Obr. 5.8: Porovnání vstupní impedance při $Z = 150 \, \Omega$ kabelu SYKFY.....	37
Obr. 5.9: Porovnání vstupní impedance při $Z = \infty$ kabelu SYKFY.....	38
Obr. 5.10: Porovnání vstupní impedance při $Z = 0$ kabelu SYKFY	38

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Určení měrné kapacity C kabelu TCEPKPFLE	10
Tabulka 3.2: Určení měrná kapacity C kabelu SYKFY	10
Tabulka 3.3: Vlnová impedance kabelu TCEPKPFLE	11
Tabulka 3.4: Vlnová impedance kabelu SYKFY	11
Tabulka 3.5: Výpočet vlnové impedance kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km.....	13
Tabulka 3.6: Výpočet vlnové impedance kabelu SYKFY	14
Tabulka 3.7: Měrná míra přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	14
Tabulka 3.8: Měrná míra přenosu kabelu SYKFY	15
Tabulka 3.9: Složkový tvar vstupní impedance při zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	17
Tabulka 3.10: Absolutní hodnota vstupní impedance při zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	17
Tabulka 3.11: Hodnoty vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE v závislosti na délce l	21
Tabulka 3.12: Vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km	22
Tabulka 4.1: Stanovení vstupní impedance z měření kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km.....	29
Tabulka 4.2: Stanovení vstupní impedance z měření kabelu SYKFY	30

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Teorie homogenního vedení.....	2
2.1 Základní vlastnosti	2
2.1.1 Primární parametry	3
2.2 Rovnice dlouhého vedení	4
2.2.1 Sekundární parametry.....	4
2.2.2 Řešení diferenciálních rovnic pro harmonický režim.....	5
2.3 Vstupní impedance různě zakončených homogenních vedení	6
3 Matematický model pro výpočet vstupní impedance.....	9
3.1 Sekundární parametry.....	9
3.1.1 Primární parametry	9
3.1.2 Vlnová impedance	11
3.1.3 Měrná míra přenosu.....	14
3.2 Hyperbolické funkce míry přenosu	15
3.3 Vstupní impedance zatížena obecnou impedancí	16
3.4 Vstupní impedance vedení nakrátko a naprázdno konečné délky	21
3.5 Programová realizace mat. modelu	25
3.5.1 Programové prostředky	25
3.5.2 Programovací jazyk Java.....	26
3.5.3 Knihovna Java Swing a JFreeChart.....	26
3.5.4 Výstupy aplikace	26
4 Experimentální ověření mat. modelu	28
4.1 Použité přístroje.....	28
4.2 Postup měření	28
4.3 Kmitočtový průběh vstupní impedance.....	29
5 Porovnání hodnot mat. modelu a měření	34
6 Zhodnocení a závěr	39
Literatura	40
Seznam příloh	41

1 Úvod

Přenosové vedení můžeme charakterizovat dvěma způsoby. První, kdy chceme vyšetřit elektrické a magnetické pole pomocí použití třídimenzionálních elektromagnetických veličin. Pak se přenosové vedení nazývá vlnovodem a použijeme Maxwellovy rovnice. Druhým způsobem je rozbor šíření signálu či energie a pak přenosové vedení zkoumáme na základě teorie obvodů za využití napětí a proudu. A právě pomocí napětí a proudu se vyjadřuje elektrický parametr vstupní impedance vedení.

Druhá kapitola se zabývá homogenním vedením s rozprostřenými parametry a jeho náhradním schématem jeho elementu a popisuje jeho primární parametry (měrný odpor R [Ω/km], měrná kapacita C [nF/km], měrný svod G [S/km] a měrná indukčnost L [H/km]). Dále odvozujeme sekundární parametry vedení (vlnovou impedanci Z_0 [Ω] a měrnou míru přenosu [km^{-1}]) pro vyjádření rovnic dlouhého vedení, které vyjadřují vztahy pro napětí a proud. Závěr kapitoly popisuje vstupní impedanci vyjádřenou z rovnic dlouhého vedení při různě zakončeném vedení.

Další kapitola popisuje sestavení matematického modelu pro výpočet vstupní impedance. Určíme si konečný vztah pro výpočet vstupní impedance zatíženého obecnou impedancí, vstupní impedance při vedení naprázdno a nakrátko ze změření primárních a sekundárních parametrů dvou různých typů kabelů (SYKFY 2x2x0,5 mm a TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm). Nakonec implementujeme tento matematický model do počítačového programu v jazyce Java, jehož výstupem je graf porovnávající vstupní impedanci.

Čtvrtá kapitola popisuje měření napěťové úrovně na začátku vedení podle daného postupu při různě zakončeném vedení na výše zmíněných typech kabelů. Závěr kapitoly uvádí kmitočtový průběh vstupní impedance podle odvozeného vztahu pro vstupní impedanci z napěťové úrovně a následné vykreslení do grafů.

Předposlední kapitola porovnává průběhy vstupní impedance matematického modelu a pomocí měření využitím vytvořeného programu. Průběhy vstupní impedance jsou zobrazeny pomocí grafů.

Poslední kapitola se zabývá závěry dosažených průběhů a hodnot vstupní impedance pro oba typy kabelů. Na závěr uvádíme přínos této práce a její možné další využití do budoucna.

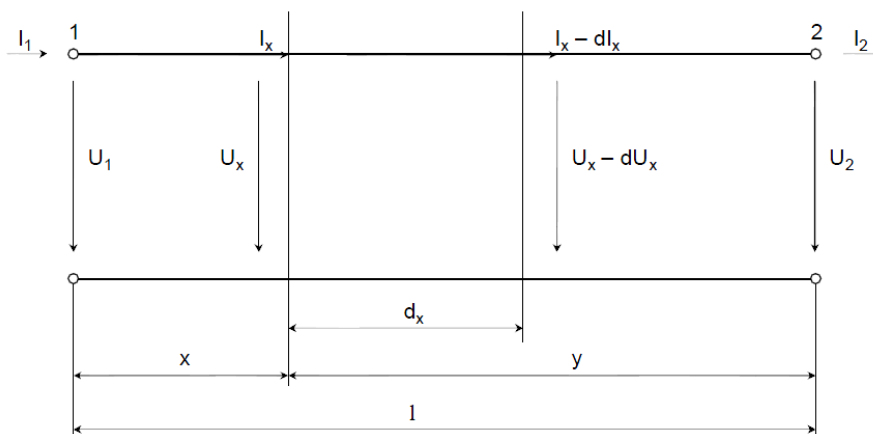
2 Teorie homogenního vedení

2.1 Základní vlastnosti

Elektricky dlouhé vedení (dlouhé vedení) je vedení, u kterého můžeme zanedbat vzdálenost mezi dvěma vodiči vůči jejich délce, ale délka není zanedbatelná vůči délce elektromagnetické vlny. Délku elektromagnetické vlny určíme podle vztahu (2.1), kdy se rychlost šíření elektromagnetické vlny podělí frekvencí:[1][2][4]

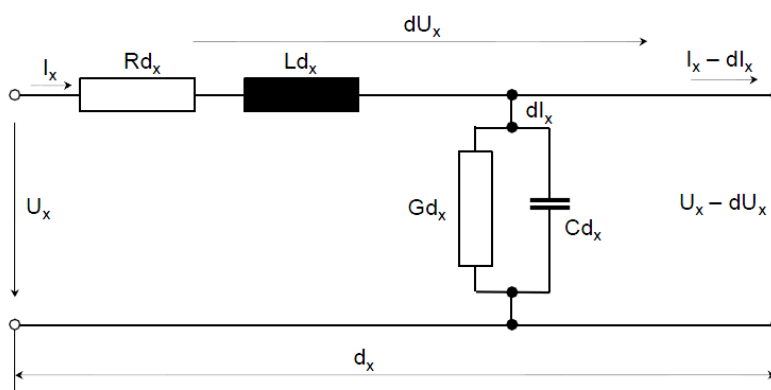
$$\lambda = v/f \text{ [km]} \quad (2.1)$$

Rozlišujeme vedení se soustředěnými parametry a vedení s rozloženými parametry (obr. 2.1). U obvodů s rozloženými parametry, platí, že elektromagnetické veličiny U a I jsou funkcí nejen času, ale i prostorových souřadnic u zařízení, kde můžeme rozměry porovnávat s délkou elektromagnetické vlny. Což je rozdíl od obvodů se soustředěnými parametry, kde se elektromagnetické veličiny mění jen v závislosti na čase, prostorová závislost se může zanedbat.[1]



Obr. 2.1: Obvod s rozloženými parametry

Vlastnosti elementu vedení dx homogenního vedení délky l můžeme nahradit schématem fyzikálního modelu, který je na obr. 2.2.[3]



Obr. 2.2: Náhradní schéma elementu dlouhého vedení

Element vedení dx je určen podélnou impedancí \bar{z} (2.2), která je daná parametry v podélném směru R a L , a příčnou admitancí \bar{y} (2.3), která je daná parametry v příčném směru G a C . Pro \bar{z} a \bar{y} platí tyto vztahy:[1][4]

$$\bar{z} = R + j \cdot \omega \cdot L [\Omega \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.2)$$

$$\bar{y} = G + j \cdot \omega \cdot C [\text{S} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.3)$$

Při přenosu harmonického signálu elementem vedení, prochází podélnou impedancí proud, který způsobuje úbytek napětí:

$$-d\bar{U}_x = (R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot \bar{I}_x \cdot dx \quad (2.4)$$

a příčná větev způsobuje úbytek proudu:[2][3]

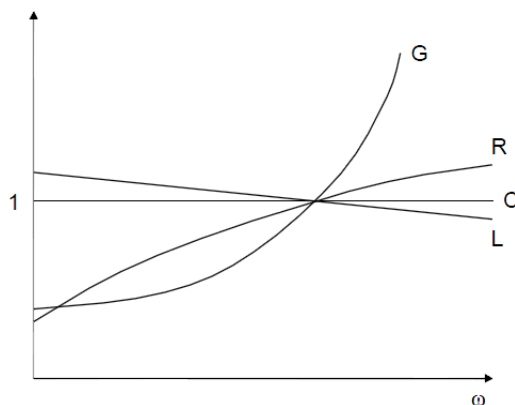
$$-d\bar{I}_x = (G + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \bar{U}_x \cdot dx \quad (2.5)$$

2.1.1 Primární parametry

Dlouhé vedení je charakterizované čtyřmi primárními parametry, které určují elektrické vlastnosti dlouhého vedení. U homogenního vedení jsou tyto primární parametry stejnoměrné (konstantní) podél celého vedení. Nejsou závislé na napětí a proudu, ale jsou frekvenčně závislé a vztahují se k jednotkové délce. Primárními parametry vedení jsou:[1][2][4]

- měrný odpor $R [\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$
- měrná indukčnost $L [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}]$
- měrná kapacita $C [\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}]$
- měrný svod $G [\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}]$

R a G s rostoucím kmitočtem silně rostou. Odpor vlivem skin efektu. Což je povrchový jev, kdy při vysokých frekvencích f střídavého elektrického proudu dochází k vytlačení elektrického proudu na povrch vodiče. U svodu je to způsobené rostoucími ztrátami v dielektriku. – viz obr. 3.[3]



Obr. 2.3: Frekvenční závislost primárních parametrů

2.2 Rovnice dlouhého vedení

Rovnice dlouhého vedení slouží k určení efektivních hodnot napětí a proudu v jakémkoliv místě vedení. Pro výpočet těchto rovnic potřebujeme znát hodnoty napětí a proudu na počátku vedení a hodnoty sekundárních parametrů.[1]

2.2.1 Sekundární parametry

Mezi sekundární parametry vedení patří vlnová (charakteristická) impedance a měrná míra přenosu, které určují přenosové vlastnosti na daném vedení. Oba parametry se určují z primárních parametrů vedení a kmitočtu. Vlnová impedance není závislá na délce a její hodnota se udává v ohmech, zatímco měrná míra přenosu je vztažena na jednotkovou délku. [2][3]

Vlnová impedance \bar{Z}_0

Vlnová impedance udává poměr napětí a proudu, který je v každém bodě přizpůsobeného vedení stejný a je to komplexní veličina. Za napětí a proud se dosadí vztahy pro úbytek napětí (2.4) a proudu (2.5), jejichž úpravou získáme konečný vztah pro vlnovou impedanci (2.6):

$$\bar{Z}_0 = \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G + j \cdot \omega \cdot C}} = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}} = |Z_0| \cdot e^{j \cdot \varphi_0} [\Omega] \quad (2.6)$$

kde $|Z_0|$ je absolutní hodnota vlnové impedance a φ_0 je fáze vlnové impedance.

Vlnová impedance se dá i určit výpočtem jako geometrický průměr vstupní impedance naprázdno a nakrátko:[3]

$$\bar{Z}_0 = \sqrt{\bar{Z}_{10} \cdot \bar{Z}_{1k}} [\Omega] \quad (2.7)$$

Měrná míra přenosu $\bar{\gamma}$

Měrná míra přenosu vyjadřuje relativní změnu napětí a proudu v každém elementu přizpůsobeného vedení vztažená na jednotkovou délku a stejně jako vlnová impedance je to komplexní veličina. Vztah měrné míry přenosu (2.8) můžeme vyjádřit buď úbytkem napětí, nebo úbytkem proudu.[2]

$$\bar{\gamma} = \frac{d\bar{U}_x}{\bar{U}_x \cdot dx} = \frac{d\bar{I}_x}{\bar{I}_x \cdot dx} = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{\bar{z} \cdot \bar{y}} \quad (2.8)$$

$$\bar{\gamma} = |\gamma| \cdot e^{j \cdot \varphi_\gamma} [km^{-1}] \quad (2.9)$$

$|\gamma|$ je absolutní hodnota měrné míry přenosu a φ_γ je argument měrné míry přenosu.

Převedením vztahu (2.9) na složkový tvar (2.10) získáme reálnou část měrné míry přenosu α a imaginární část měrné míry přenosu β . Reálná část α udává hodnotu měrného útlumu v [dB·km⁻¹], popřípadě v [Np·km⁻¹], kdy se 1Np = 8,686dB. Imaginární část β se nazývá měrný fázový posuv a udává se v [rad·km⁻¹].[2][3]

$$\bar{\gamma} = |\gamma| \cdot e^{j\varphi_\gamma} = |\gamma| \cdot (\cos \varphi_\gamma + j \sin \varphi_\gamma) = \alpha + j\beta \quad (2.10)$$

Měrný fázový posuv β udává zpoždění fáze šířící se vlny na jednotku délky a občas se nazývá jako konstanta vlnové délky. Její hodnota je závislá na typu a konkrétních parametrech vedení. Zpoždění fáze o 360° (2π) nastává ve vzdálenosti jedné délky vlny λ , která je pak daná vztahem:[2]

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} [km] \quad (2.11)$$

Fázová rychlost šíření v_f (2.11) udává rychlost, jakou se šíří fáze postupující harmonické vlny, která se vypočte podle vztahu (2.12):[2]

$$v_f = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta} [km \cdot s^{-1}] \quad (2.12)$$

Signál, který se přenáší, má většinou složitější tvar a je tvořen skupinou harmonických vln s blízkou hodnotou vlnové délky. Abychom mohli posoudit rychlost šíření tohoto signálu, určuje se parametr skupinová rychlost šíření v_{sk} (2.13). Tato rychlost závisí na šířce pásma kmitočtů skupiny vln a odpovídají změně měrného fázového posuvu podle vztahu:

$$v_{sk} = \frac{d\omega}{d\beta} [km \cdot s^{-1}] \quad (2.13)$$

Teorie délky vlny, fázové a skupinové rychlosti šíření podle [2].

2.2.2 Řešení diferenciálních rovnic pro harmonický režim

Získáním diferenciálních rovnic ze vztahů pro úbytek napětí (2.4) a proudu (2.5) a jejich následnou úpravou získáme rovnice pro výpočet napětí \bar{U}_x (2.14) a proudu \bar{I}_x (2.15) v jakémkoliv místě vedení:[1][3][4]

$$\bar{U}_x = \bar{U}_1 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot x) - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_1 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot x) \quad (2.14)$$

$$\bar{I}_x = -\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot x) + \bar{I}_1 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot x) \quad (2.15)$$

Dosazením délky vedení l místo hodnoty x do (2.14) a (2.15), máme vztahy pro výpočet napětí \bar{U}_2 (2.16) a proudu \bar{I}_2 (2.17), tzv. zpětné kaskádové rovnice:[1][3][4]

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_1 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.16)$$

$$\bar{I}_2 = -\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{I}_1 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.17)$$

Pro výpočet vstupní impedance \bar{Z}_1 potřebujeme zjistit vztahy pro napětí \bar{U}_1 (2.18) a proud \bar{I}_1 (2.19), které si vyjádříme z kaskádových rovnic:[1][3][4]

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.18)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{I}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.19)$$

Přízpusobené vedení je zatížené impedancí, která se rovná vlnové impedanci. Pak jsou rovnice pro \bar{U}_1 , \bar{I}_1 a \bar{U}_2 , \bar{I}_2 dány vztahy (2.20) a (2.21):[1]

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \cdot e^{\bar{\gamma} \cdot l}, \quad \bar{I}_1 = \bar{I}_2 \cdot e^{\bar{\gamma} \cdot l} \quad (2.20)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 \cdot e^{-\bar{\gamma} \cdot l}, \quad \bar{I}_2 = \bar{I}_1 \cdot e^{-\bar{\gamma} \cdot l} \quad (2.21)$$

2.3 Vstupní impedance různě zakončených homogenních vedení

Vstupní impedance \bar{Z}_1 obecně závisí na zakončení, délce vedení l a typu vedení. Obecné vyjádření \bar{Z}_1 má vztah (2.22):

$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} [\Omega] \quad (2.22)$$

U vedení zatíženého obecnou impedancí \bar{Z} vyjádříme \bar{Z}_1 ze vztahů pro vstupní napětí \bar{U}_1 (2.18) a vstupního proudu \bar{I}_1 (2.19):

$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} = \frac{\bar{U}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{I}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} \quad (2.23)$$

V rovnici (2.23) podělíme činitele i jmenovatele výstupním proudem \bar{I}_2 a získáme vztah:

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_0 \cdot \frac{\bar{Z} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\bar{Z} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} \quad (2.24)$$

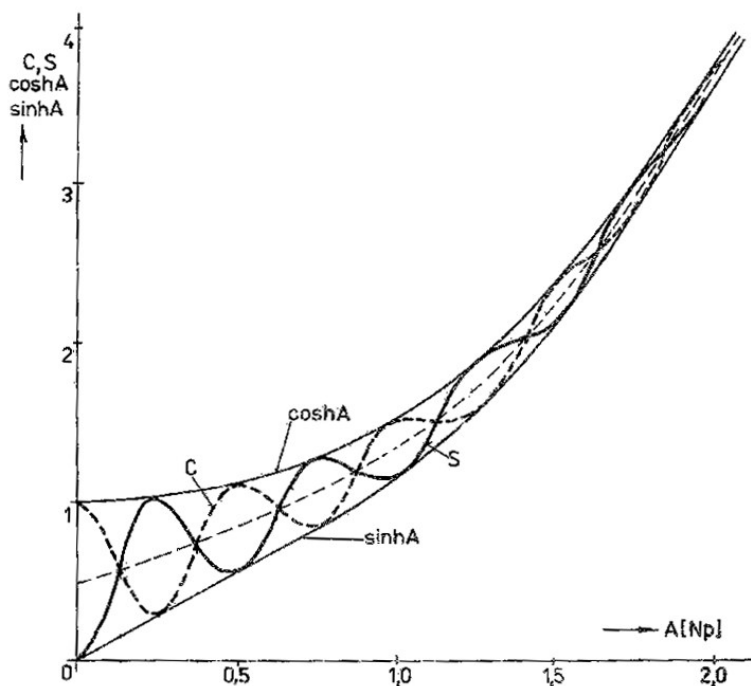
U nekonečně dlouhého vedení určíme vztah pro \bar{Z}_1 pomocí průběhu $\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$ a $\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$. Jelikož jsou to komplexní veličiny, můžeme si je vyjádřit v exponenciálním tvaru. Podle průběhu absolutních hodnot hyperbolického cosinu míry přenosu C a hyperbolického sinu míry přenosu S jako funkce vlnového útlumu A [Np] na obr 2.4, pak vidíme, že pro velké hodnoty A (teoreticky $A = \infty$) platí:

$$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l) = \cosh(\alpha \cdot l) = \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) = \sinh(\alpha \cdot l) \quad (2.25)$$

Vztah pro vstupní impedanci \bar{Z}_1 můžeme pak pomocí (2.25) zapsat jako vztah (2.26):

$$\bar{Z}_{1\infty} = \bar{Z}_0 \cdot \frac{(\bar{Z} + \bar{Z}_0) \cosh(\alpha \cdot l)}{(\bar{Z} + \bar{Z}_0) \cosh(\alpha \cdot l)} = \bar{Z}_0 \quad (2.26)$$

U nekonečně dlouhého vedení, pak dále platí, že se $\bar{Z}_{1\infty} = \bar{Z}_0$ i při jakémkoliv zakončení Z , tedy i v případě vedení naprázdno nebo nakrátko.



Obr. 2.4: Závislost C , S , $\cosh A$, $\sinh A$ na vlnovém útlumu[3]

Pokud je vedení konečné délky zatížené vlnovou impedancí ($\bar{Z} = \bar{Z}_0$), pak úpravou vztahu (2.24) dostaneme:

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_0 \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\bar{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) + \bar{Z}_0 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} = \bar{Z}_0 \quad (2.27)$$

Z výsledného vztahu (2.27) pak platí, že nezáleží na délce vedení l a ani na typu vedení.

U vedení naprázdno konečné délky (konec vedení je rozpojený) platí $\bar{Z}_{20} \rightarrow \infty$, $\bar{I}_{20} = 0$. Dosazením této podmínky do rovnice (2.18) a (2.19) bude mít napětí \bar{U}_{10} a proud \bar{I}_{10} vztahy:

$$\bar{U}_{10} = \bar{U}_{20} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.28)$$

$$\bar{I}_{10} = \frac{\bar{U}_{20}}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.29)$$

Ze vztahů pro napětí a proud naprázdno (2.28) a (2.29) vyjádříme vstupní impedanci \bar{Z}_{10} v závislosti na délce l :

$$\bar{Z}_{10} = \frac{\bar{U}_{10}}{\bar{I}_{10}} = \frac{\bar{U}_{20} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\frac{\bar{U}_{20}}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)} = \bar{Z}_0 \cdot \coth(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.30)$$

Průběh vstupní impedance naprázdno závisí na kmitočtovém průběhu vlnové impedance a na kmitočtovém průběhu \coth .

Pro vedení nakrátko konečné délky platí $\bar{Z}_{2k} = 0, \bar{U}_{2k} = 0$. Po dosazení těchto podmínek do rovnic (2.18) a (2.19) má napětí \bar{U}_{1k} a proud \bar{I}_{1k} vztah:

$$\bar{U}_{1k} = \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_{2k} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.31)$$

$$\bar{I}_{1k} = \bar{I}_{2k} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.32)$$

Vztah pro vstupní impedanci \bar{Z}_{1k} v závislosti na délce l získáme podělením vztahů (2.31) a (2.32).

$$\bar{Z}_{1k} = \frac{\bar{U}_{1k}}{\bar{I}_{1k}} = \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_{2k} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\bar{I}_{2k} \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} = \bar{Z}_0 \cdot \tanh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (2.33)$$

Průběh vstupní impedance nakrátko taky závisí na kmitočtovém průběhu vlnové impedance a na kmitočtovém průběhu \tanh .

Teorie vstupní impedance podle [3].

3 Matematický model pro výpočet vstupní impedance

Cílem praktické části bakalářské práce bylo vytvoření matematického modelu vstupní impedance Z_I a jeho experimentální ověření na reálném médiu. A to na 4 různých délkách kabelového vedení TCEPKPFLE 15x4x0,4 a na jedné délce sdělovacího kabelu SYKFY 2x2x0,5. U každého vedení se vyjádřil matematický model a provedlo praktické měření při následující zátěži:

- $Z = \infty$ (vedení naprázdno)
- $Z = 0$ (vedení nakrátko)
- $Z = 600 \Omega$
- $Z = 400 \Omega$
- $Z = 150 \Omega$

Pro výpočet vstupní impedance využijeme upraveného obecného vztahu vstupní impedance v závislosti na typu zátěže. Při zátěži $Z = \infty$ použijeme vztah (2.30) pro vstupní impedanci při vedení naprázdno při konečné délce. U zátěže $Z = 0$ je to vztah (2.33) pro vstupní impedanci při vedení nakrátko při konečné délce. Vedení zatížené obecnou impedancí Z (600Ω , 400Ω a 150Ω) má vstupní impedance vztah (2.24).

Pro výpočet těchto vstupních impedancí je si třeba vyjádřit sekundární parametry vedení (vlnovou impedanci \bar{Z}_0 a měrnou míru přenosu $\bar{\gamma}$) a hyperbolické funkce míry přenosu.

3.1 Sekundární parametry

3.1.1 Primární parametry

Pro vyjádření vlnové impedance a měrné míry přenosu je nejprve zapotřebí určit primární parametry měrný odpor R a měrnou kapacitu C . Měrnou indukčnost a měrný svod zanedbáváme: $L \cong G \cong 0$.

Měrný odpor vedení R , který se vztahuje k jednotkové délce jako všechny primární parametry, má vztah:

$$R = 10^3 \cdot \frac{\rho}{S} [\Omega \cdot km^{-1}] \quad (3.1)$$

kde ρ je měrný odpor vodiče a S je průřez vodiče. Pro měděné vedení je hodnota měrného odporu vodiče $\rho = 0,01785 mm^2 \cdot m^{-1}$. Průřez vedení vypočteme z hodnot průměru žil 0,4mm pro kabel TCEPKPFLE a 0,5mm pro kabel SYKFY. Výsledný měrný odpor TCEPKPFLE kabelu má pak hodnotu:

$$R = 10^3 \cdot \frac{\rho}{S} = 10^3 \cdot \frac{0,01785}{\pi \cdot 0,2^2} = 142,05 \Omega \cdot km^{-1}$$

a měrný odpor SYKFY kabelu je:

$$R = 10^3 \cdot \frac{\rho}{S} = 10^3 \cdot \frac{0,01785}{\pi \cdot 0,25^2} = 90,9 \Omega \cdot km^{-1}$$

Pro hodnotu měrné kapacity C nejprve určíme délku vedení l [km] (3.2) a průměrnou efektivní dílčí kapacitu C_s [nF] (3.3). Délka vedení se určí pomocí průměrného odporu smyčky R_s [Ω] a měrného odporu R . R_s je aritmetickým průměrem hodnot odporu smyčky R_{ab} a R_{cd} [Ω], které zjistíme měřením. Dále na vedení změříme jednotlivé efektivní dílčí kapacity C_{ac} , C_{ad} , C_{bc} , C_{bd} a C_{ab} [nF], z kterých se vypočítá aritmetický průměr, což je hodnota C_s . Tato hodnota se podělí délkou vedení a získá se měrná kapacita vedení C .

$$l = \frac{\frac{R_{ab} + R_{cd}}{2}}{2 \cdot R} = \frac{R_s}{2 \cdot R} [km] \quad (3.2)$$

$$C = \frac{\frac{C_{ab} + C_{ac} + C_{bc} + C_{ad} + C_{bd}}{5}}{l} = \frac{C_s}{l} [nF \cdot km^{-1}] \quad (3.3)$$

Hodnoty odporu smyčky R_s , efektivní dílčí kapacity C_s , délky vedení l a měrné kapacity C jsou uvedeny v tabulce 3.1 pro kabel TCEPKPFLE a v tabulce 3.2 pro kabel SYKFY.

Vedení:	B	C	D	E	F	G	J	L	M	N
R_s [Ω]	482,5	215	305,5	391,5	530	177	367	540	231	471,5
C_s [nF]	79,66	35,34	51,36	63,56	85,9	28,6	60,74	88,8	38,28	76,74
l [km]	1,698	0,757	1,075	1,378	1,866	0,623	1,292	1,901	0,813	1,660
C [nF/km]	46,904	46,698	47,762	46,124	46,046	45,905	47,020	46,719	47,079	46,239

Tabulka 3.1: Určení měrné kapacity C kabelu TCEPKPFLE

Jelikož jsou primární parametry vztaženy k jednotkové délce, jedná se o konstanty na daném typu vedení. Proto jsem si u kabelu TCEPKPFLE určil měrnou kapacitu vedení C jako aritmetický průměr z vypočtených měrných kapacit jednotlivých délek. Měrná kapacita C má pak výslednou hodnotu:

$$C = \frac{C_B + C_C + C_D + C_E + C_F + C_G + C_J + C_L + C_M + C_N}{10} = \frac{466,496}{10} = 46,6496 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

V případě kabelu SYKFY jsme prováděli měření jen na jedné délce, určíme měrnou kapacitu C přímo z této konkrétní délky.

SYKFY	
R_s [Ω]	49
C_s [nF]	47,04
l [km]	0,270
C [nF/km]	174,528

Tabulka 3.2: Určení měrné kapacity C kabelu SYKFY

$$C = \frac{C_s}{l} = \frac{47,04}{0,270} = 174,528 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}$$

Výpočet vstupní impedance a ověření pomocí měření jsem prováděl na kabelu TCEPKPFLE, označených G, D, E a N a na sdělovacím kabelu SYKFY.

3.1.2 Vlnová impedance

Matematické vyjádření vlnové impedance pro výpočet vstupní impedance se určí z průběhu vlnové impedance určené pomocí měření. Tu získáme z geometrického průměru vstupní impedance naprázdno \bar{Z}_{1k} a nakrátko \bar{Z}_{10} podle vztahu (2.7). \bar{Z}_{1k} a \bar{Z}_{10} získáme měřením, které je podrobněji popsáno v kapitole 4.

Vlnovou impedanci podle (2.7) jsem určil na všech 5 kabelech. Hodnoty Z_{1k} , Z_{10} a Z_0 kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km a kabelu SYKFY jsou uvedeny v kapitole 4, tabulka 4.1 a 4.2. Další hodnoty Z_{1k} , Z_{10} a Z_0 ostatních délek kabelu TCEPKPFLE jsou uvedeny v příloze D. Všechny hodnoty vlnové impedance podle (2.7) v závislosti na frekvencích kabelů TCEPKPFLE jsou uvedeny v tabulce 3.3 a vynesené do grafu na obr. 3.1. Hodnoty kabelu SYKFY jsou v tabulce 3.4 a na obr. 3.2.

f [kHz]	10	20	25	30	36	40	52
Z_0 [Ω]	316	231	200	187	183	169	157
f [kHz]	64	68	76,9	90,3	97,47	115,8	120,3
Z_0 [Ω]	145	147	145	139	139	134	133
f [kHz]	126,3	131,1	147,7	152,3	155,1	176,5	183,8
Z_0 [Ω]	134	131	133	132	129	126	128
f [kHz]	192,4	204,26	217,7	226,9	245,8	270,8	272,2
Z_0 [Ω]	125	118	120	120	117	114	113
f [kHz]	280,6	311,35	345,9	351,6	391,2	413,8	431,5
Z_0 [Ω]	111	110	112	112	110	111	107
f [kHz]	472,8	489,5	523,5	562,1	637,9	702,5	
Z_0 [Ω]	107	104	100	99	99	93	

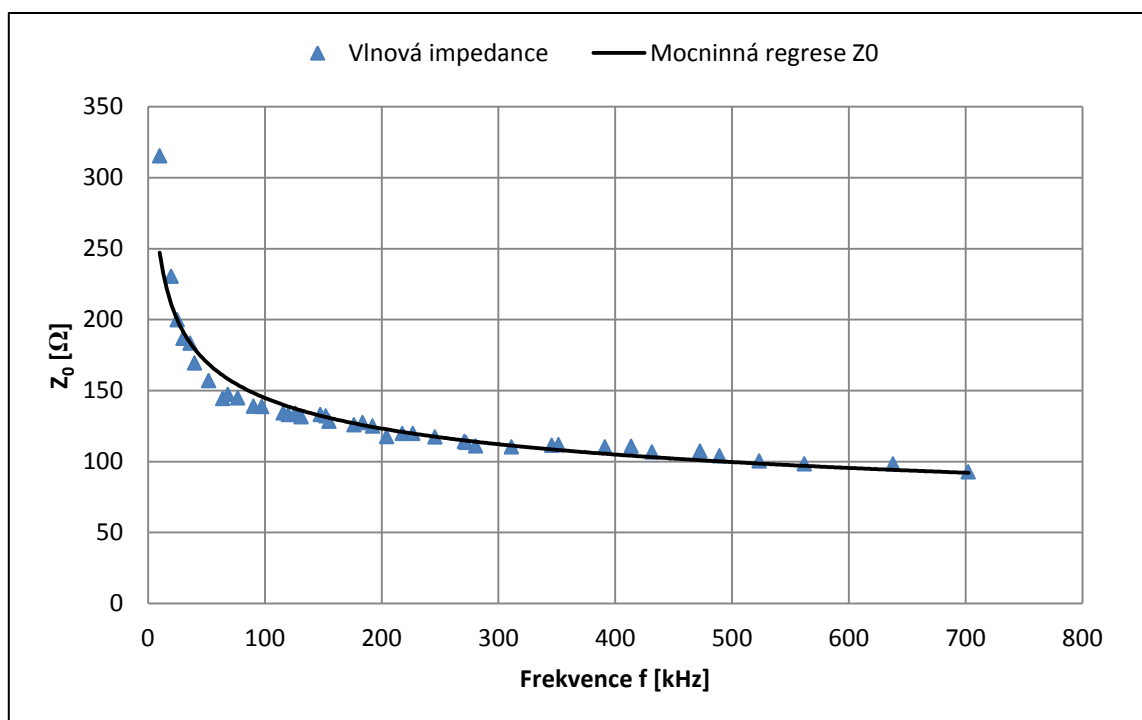
Tabulka 3.3: Vlnová impedance kabelu TCEPKPFLE

f [kHz]	50	102,8	230,9	372,9	513	699,6
Z_0 [Ω]	78	82	74	70	67	62

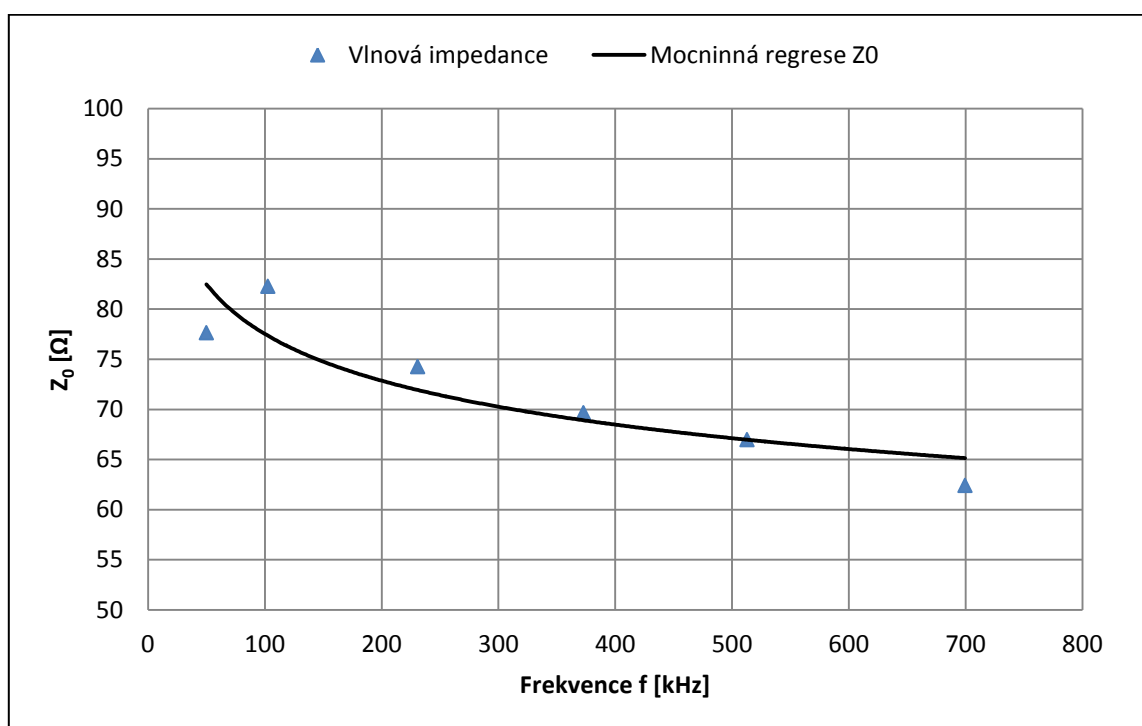
Tabulka 3.4: Vlnová impedance kabelu SYKFY

Pro matematické vyjádření vlnové impedance se využije regresní analýzy. Regresní analýza je forma statistické analýzy, která se používá pro předpovědi. Cílem regresní analýzy je určení stanovení formy (trendu, tvaru, průběhu) této závislosti pomocí vhodné funkce. Tato funkce nám určí průběh závislosti mezi dvěma náhodnými proměnnými. Pro grafické znázornění se používá spojnice trendu. Pro vyjádření absolutní hodnoty vlnové impedance jako funkce frekvence byla použita mocninná regrese v obecném tvaru, kde f je frekvence v jednotkách Hz:

$$Z_0 = a \cdot f^b \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.4)$$



Obr. 3.1: Vlnová impedance kabelu TCEPKPFLE



Obr. 3.2: Vlnová impedance kabelu SYKFY

Vztah vlnové impedance je pro kabel TCEPKPFLE podle obr 3.1:

$$Z_0 = 2101 \cdot f^{-0,232} [\Omega] \quad (3.5)$$

a pro kabel SYKFY podle obr 3.2:

$$Z_0 = 217 \cdot f^{-0,089} [\Omega] \quad (3.6)$$

Dosazením nulové měrné indukčnosti L a nulového měrného svodu G do vztahu (2.6) si vyjádříme exponenciální tvar vlnové impedance.

$$\bar{Z}_0 = \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G + j \cdot \omega \cdot C}} = \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot 0}{0 + j \cdot \omega \cdot C}} = \sqrt{\frac{R \cdot e^{j0}}{\omega \cdot C \cdot e^{j90}}} = \sqrt{\frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}} \cdot e^{-45^\circ} = |Z_0| \cdot e^{-45^\circ} [\Omega]$$

Exponenciální tvar \bar{Z}_0 si převedeme na goniometrický tvar \bar{Z}_0 . Za absolutní hodnotu vlnové impedance se dosadí matematické vyjádření Z_0 (3.5) a (3.6) a za argument φ hodnota -45° . Výpočet vlnové impedance TCEPKPFLE má pak vztah:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_0 &= |Z_0| \cdot (\cos -45^\circ + j \cdot \sin -45^\circ) = 2101 \cdot f^{-0,232} \cdot (0,707 - j \cdot 0,707) \\ \bar{Z}_0 &= (1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232} [\Omega] \end{aligned} \quad (3.7)$$

U kabelu SYKFY má \bar{Z}_0 tvar:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_0 &= |Z_0| \cdot (\cos -45^\circ + j \cdot \sin -45^\circ) = 217 \cdot f^{-0,089} \cdot (0,707 - j \cdot 0,707) \\ \bar{Z}_0 &= (153,419 - j \cdot 153,419) \cdot f^{-0,089} [\Omega] \end{aligned} \quad (3.8)$$

V tabulce 3.5 pro kabel TCEPKPFLE s označením G a v tabulce 3.6 pro kabel SYKFY jsou uvedeny absolutní hodnoty Z_0 a jejich reálné a imaginární části. Ostatní hodnoty Z_0 zbylých délek kabelu TCEPKPFLE jsou v příloze A, tabulka 1 – 2.

f [kHz]	$ Z_0 $ [Ω]	$Re(Z_0)$ [Ω]	$Im(Z_0)$ [Ω]
20	211	149	-149
30	192	136	-136
40	180	127	-127
64	161	114	-114
131,1	137	97	-97
204,26	123	87	-87
270,86	115	82	-82
345,9	109	77	-77
413,8	105	74	-74
489,5	101	71	-71
562,1	97	69	-69
637,9	95	67	-67
702,5	92	65	-65

Tabulka 3.5: Výpočet vlnové impedance kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km

f [kHz]	$ Z_0 $ [Ω]	$Re(Z_0)$ [Ω]	$Im(Z_0)$ [Ω]
50	83	59	-59
102,8	78	55	-55
230,9	72	51	-51
372,9	69	49	-49
513	67	48	-48
699,6	66	46	-46

Tabulka 3.6: Výpočet vlnové impedance kabelu SYKFY

3.1.3 Měrná míra přenosu

Měrná míra přenosu $\bar{\gamma}$ se určí výpočtem z primárních parametrů vedení. Při zanedbání měrné indukčnosti a měrného svodu můžeme vztah (2.8) upravit na tvar:

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{z} \cdot \bar{y}} = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{(R) \cdot (j \cdot \omega \cdot C)} = \sqrt{(R \cdot e^{j0}) \cdot (\omega \cdot C \cdot e^{j90})}$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{R \cdot \omega \cdot C} \cdot e^{j\frac{90}{2}} = (\sqrt{R \cdot \omega \cdot C} \cdot \cos(45)) + j \cdot (\sqrt{R \cdot \omega \cdot C} \cdot \sin(45))$$

$$\bar{\gamma} = \left(\sqrt{R \cdot \omega \cdot C} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + j \cdot \left(\sqrt{R \cdot \omega \cdot C} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\frac{R \cdot \omega \cdot C}{2}} + j \cdot \left(\sqrt{\frac{R \cdot \omega \cdot C}{2}} \right) [km^{-1}] \quad (3.9)$$

Vypočtené hodnoty měrného útlumu α a měrného fázového posunu β kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km jsou v tabulce 3.7 a kabelu SYKFY v tabulce 3.8. Další hodnoty kabelu TCEPKPFLE jednotlivých délek jsou v příloze A, tabulka 1 – 2.

f [kHz]	α [Np·km ⁻¹]	β [rad·km ⁻¹]
20	0,645	0,645
30	0,790	0,790
40	0,913	0,913
64	1,154	1,154
131,1	1,652	1,652
204,26	2,062	2,062
270,86	2,375	2,375
345,9	2,683	2,683
413,8	2,935	2,935
489,5	3,192	3,192
562,1	3,421	3,421
637,9	3,644	3,644
702,5	3,824	3,824

Tabulka 3.7: Měrná míra přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km

$f [kHz]$	$\alpha = [Np \cdot km^{-1}]$	$\beta = [rad \cdot km^{-1}]$
50	1,579	1,579
102,8	2,264	2,264
230,9	3,392	3,392
372,9	4,311	4,311
513	5,056	5,056
699,6	5,905	5,905

Tabulka 3.8: Měrná míra přenosu kabelu SYKFY

3.2 Hyperbolické funkce míry přenosu

Hyperbolické funkce jsou funkce, které jsou podobné goniometrickým funkcím. Mezi hyperbolické funkce patří $\sinh z$ (hyperbolický sinus), $\cosh z$ (hyperbolický kosinus), $\tanh z$ (hyperbolický tangens), $\coth z$ (hyperbolický kotangens), $\operatorname{sech} z$ (hyperbolický sekans) a $\operatorname{csch} z$ (hyperbolický kosekans). Definují se odstraněním i v exponentu u vyjádření goniometrické funkce v komplexním oboru. Např.

$$\cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} \Rightarrow \cosh z = \frac{e^z + e^{-z}}{2} \quad (3.10)$$

Pro výpočet vstupní impedance potřebujeme znát pouze první 4 funkce. Parametrem hyperbolické sinu a hyperbolického kosinu je míra přenosu. Parametrem je komplexní číslo a proto využijeme součtových vzorců pro hyperbolické funkce upravené pro komplexní čísla.

$$\sinh(\bar{\gamma} \cdot l) = \sinh(\alpha \cdot l) \cos(\beta \cdot l) + j \cosh(\alpha \cdot l) \sin(\beta \cdot l) \quad (3.11)$$

$$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l) = \cosh(\alpha \cdot l) \cos(\beta \cdot l) + j \sinh(\alpha \cdot l) \sin(\beta \cdot l) \quad (3.12)$$

Hyperbolický tangens a hyperbolický kotangens jsou dány podílem hyperbolické sinu a hyperbolického kosinu. Dosazením hodnot $\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$ a $\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$ získáváme dělení dvou komplexních čísel. Podle pravidel dělení komplexních čísel se zlomek rozšíří číslem sdruženým ke jmenovateli:

$$\tanh(\bar{\gamma} \cdot l) = \frac{\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \cdot \left(\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \right) \quad (3.13)$$

$$\coth(\bar{\gamma} \cdot l) = \frac{\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)} = \frac{ca + db}{a^2 + b^2} + j \cdot \left(\frac{da - cb}{a^2 + b^2} \right) \quad (3.14)$$

kde: $a = \operatorname{Re}(\sinh(\bar{\gamma} \cdot l))$, $b = \operatorname{Im}(\sinh(\bar{\gamma} \cdot l))$, $c = \operatorname{Re}(\cosh(\bar{\gamma} \cdot l))$ a $d = \operatorname{Im}(\cosh(\bar{\gamma} \cdot l))$.

Vypočtené hodnoty hyperbolických funkcí míry všech kabelů jsou uvedeny v příloze B, tabulka 3 – 7. Teorie hyperbolických funkcí podle [10].

3.3 Vstupní impedance zatížena obecnou impedancí

Vycházíme ze vztahu (2.24), kde za vlnovou impedanci dosadíme vztahy pro výpočet \bar{Z}_0 (3.7) u kabelu TCEPKPFLE a (3.8) u kabelu SYKFY. Dále dosadíme za Z hodnoty 600 Ω , 400 Ω a 150 Ω a hyperbolické funkce sinus a kosinus míry přenosu. Pro kabel TCEPKPFLE je pak konečný vztah \bar{Z}_1 :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \\ &= (1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232} \\ &\cdot \frac{Z \cdot (c + jd) + [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (a + jb)}{Z \cdot (a + jb) + [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (c + jd)}\end{aligned}\quad (3.15)$$

a pro kabel SYKFY:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \\ &= (153,419 - j \cdot 153,419) \cdot f^{-0,089} \\ &\cdot \frac{Z \cdot (c + jd) + [(153,419 - j \cdot 153,419) \cdot f^{-0,089}] \cdot (a + jb)}{Z \cdot (a + jb) + [(153,419 - j \cdot 153,419) \cdot f^{-0,089}] \cdot (c + jd)}\end{aligned}\quad (3.16)$$

Vypočtené hodnoty vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km jsou v tabulce 3.9 a 3.10. Ostatní hodnoty vstupní impedance jednotlivých délek kabelu TCEPKPFLE a kabelu SYKFY jsou v příloze C, tabulka 6 – 9. Průběhy absolutních hodnot Z_l a Z_0 kabelu SYKFY a všech délek kabelu TCEPKPFLE a jsou na grafech na obr. 3.3 až 3.7.

Př. vedení G:

$$f = 131,1kHz, Z = 600\Omega, \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) = 1,5778 + j0,0219, \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) = 1,2206 + j0,0283$$

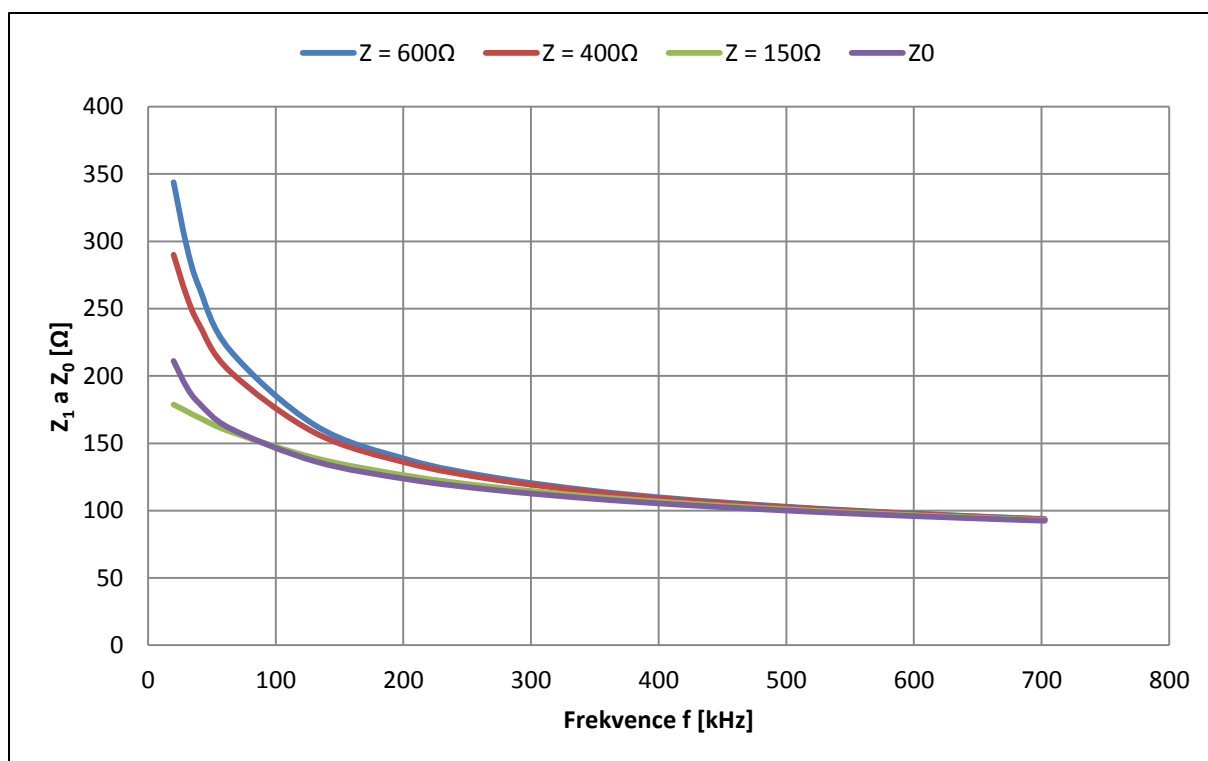
$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \\ &= (1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232} \\ &\cdot \frac{600 \cdot (1,5778 + j0,0219) + [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (1,2206 + j0,0283)}{600 \cdot (1,2206 + j0,0283) + [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (1,5778 + j0,0219)} = \\ &= [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \\ &\cdot \frac{(951 + j13,14) + [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (1,2206 + j0,0283)}{(732,36 + j16,98) + [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (1,5778 + j0,0219)} = \\ &= (96,502 - j96,502) \cdot \frac{(951 + j13,14) + (96,502 - j96,502) \cdot (1,2206 + j0,0283)}{(732,36 + j16,98) + (96,502 - j96,502) \cdot (1,5778 + j0,0219)} = \\ &= (96,552 - j96,552) \cdot \frac{1067,221 - j101,992}{886,775 - j133,172} = (96,552 - j96,552) \cdot (1,1939 + j0,644) \\ \bar{Z}_1 &= 121,445 - j109,022\Omega \\ |Z_1| &= \sqrt{121,445^2 + (-109,022)^2} \doteq 163\Omega\end{aligned}$$

f [kHz]	$Z = 600\Omega$		$Z = 400\Omega$		$Z = 150\Omega$	
	$Re(Z_I) [\Omega]$	$Im(Z_I) [\Omega]$	$Re(Z_I) [\Omega]$	$Im(Z_I) [\Omega]$	$Re(Z_I) [\Omega]$	$Im(Z_I) [\Omega]$
20	301,332	-165,718	260,606	-127,340	162,780	-73,852
30	251,019	-159,436	225,637	-129,287	154,131	-80,479
40	218,340	-151,703	201,123	-127,665	146,531	-84,322
64	172,396	-135,516	164,060	-120,440	132,034	-88,261
131,1	121,445	-109,022	119,207	-103,111	107,998	-87,438
204,26	100,100	-94,554	99,229	-91,673	94,204	-83,214
270,86	89,669	-86,565	89,218	-84,852	86,400	-79,551
345,9	82,205	-80,422	81,962	-79,379	80,335	-76,020
413,8	77,498	-76,353	77,348	-75,648	76,295	-73,323
489,5	73,576	-72,843	73,483	-72,367	72,801	-70,764
562,1	70,649	-70,154	70,588	-69,817	70,121	-68,662
637,9	68,176	-67,839	68,136	-67,597	67,811	-66,757
702,5	66,406	-66,158	66,377	-65,973	66,135	-65,321

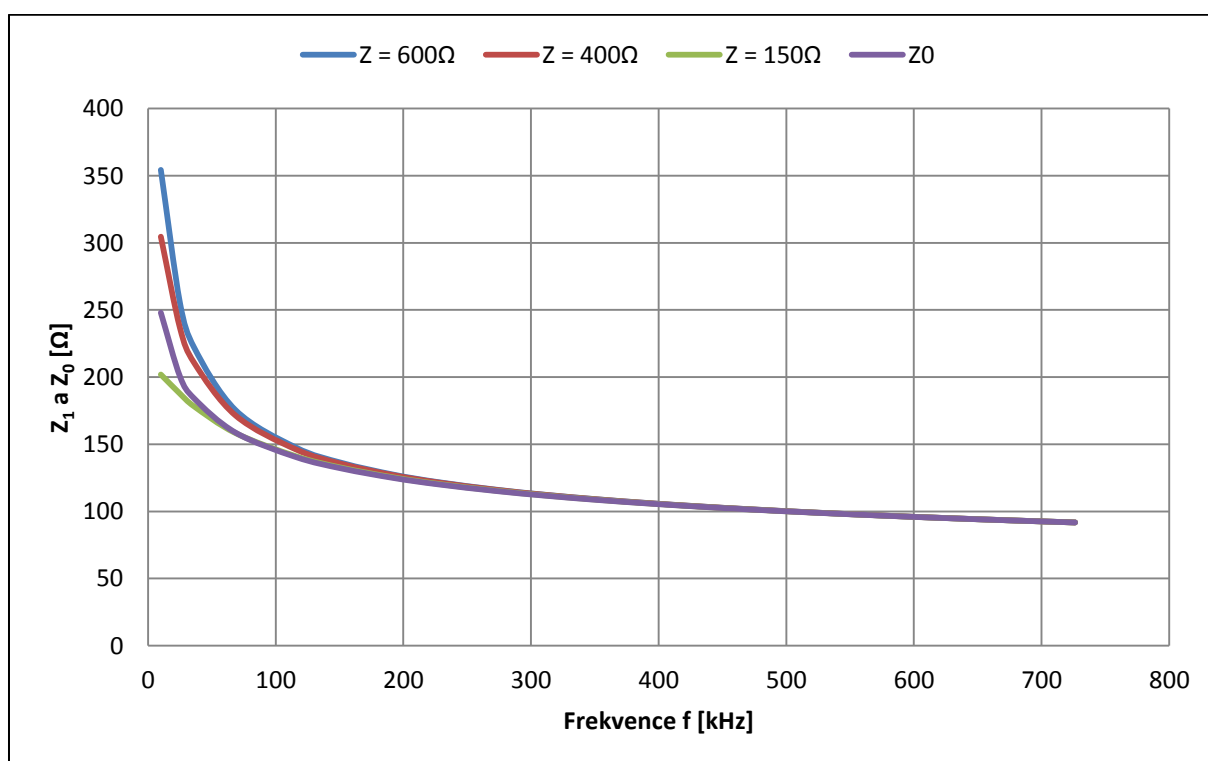
Tabulka 3.9: Složkový tvar vstupní impedance při zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km

f [kHz]	$Z = 600\Omega$	$Z = 400\Omega$	$Z = 150\Omega$
	$ Z_I [\Omega]$	$ Z_I [\Omega]$	$ Z_I [\Omega]$
20	344	290	179
30	297	260	174
40	266	238	169
64	219	204	159
131,1	163	158	139
204,26	138	135	126
270,86	124	123	117
345,9	115	114	111
413,8	109	108	106
489,5	104	103	102
562,1	100	99	98
637,9	96	96	95
702,5	94	94	93

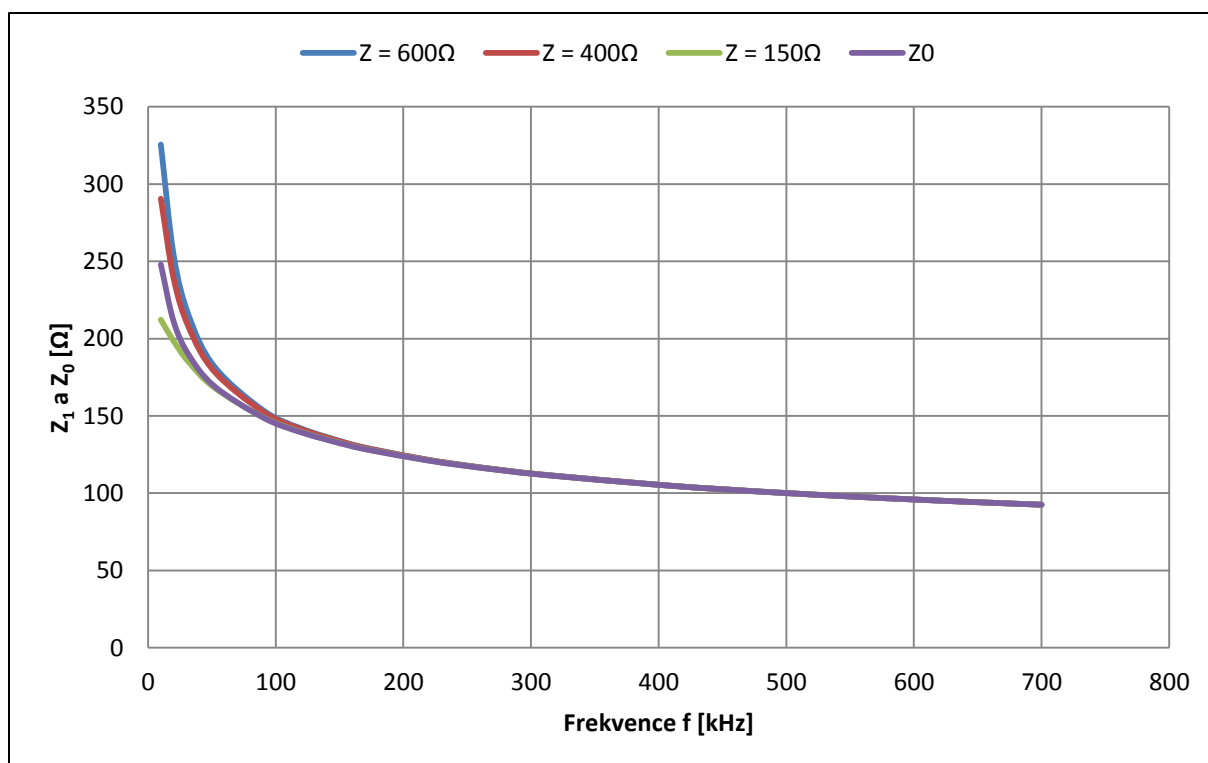
Tabulka 3.10: Absolutní hodnota vstupní impedance při zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



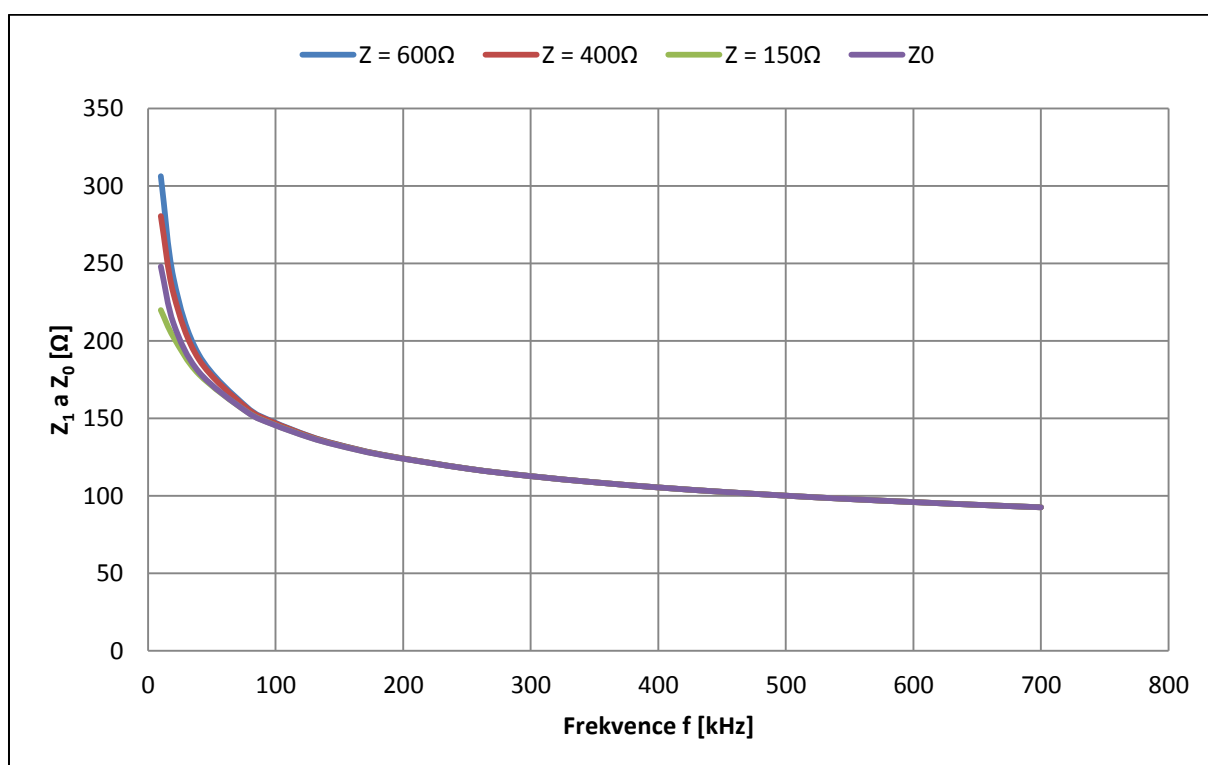
Obr. 3.3: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



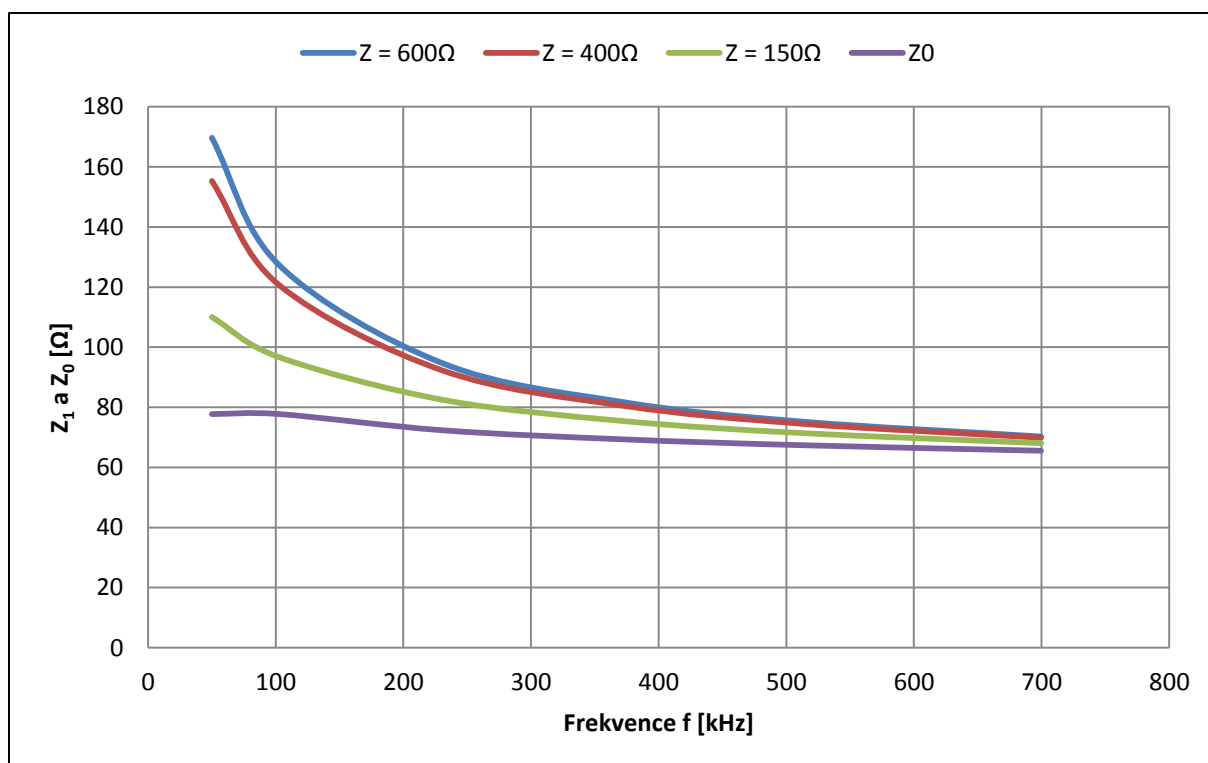
Obr. 3.4: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km



Obr. 3.5: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km



Obr. 3.6: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km



Obr. 3.7: Průběh vstupní impedance při obecné zátěži Z kabelu SYKFY

Z grafů na obr. 3.3 – 3.6 lze pozorovat, že s rostoucí frekvencí se hodnoty vstupní impedance blíží hodnotám vlnové impedance.

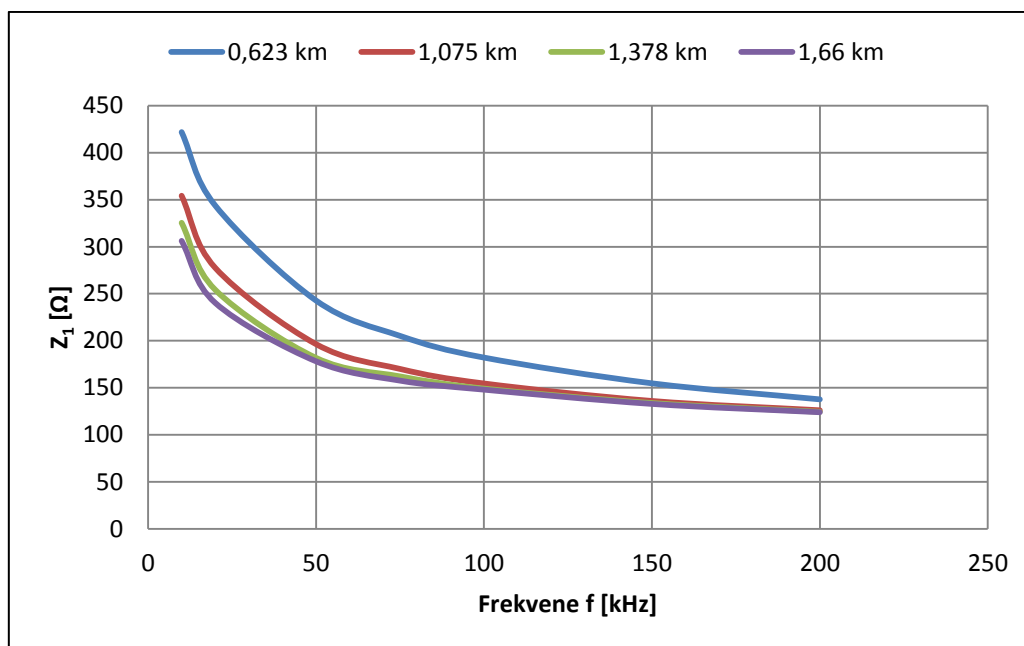
Z grafu na obr. 3.3 vidíme, že přibližně od frekvence 300 kHz lze považovat vedení za elektricky dlouhé. Zakončení se na začátku vedení téměř neprojeví (křivky splývají s průběhem Z_0). Nejlépe to můžeme pozorovat při zakončení $Z = 150 \Omega$, kdy se vstupní impedance rovná vlnové impedanci od nejnižších frekvencí. Na obr. 3.4 – 3.6 vidíme, že se vzrůstající délkou klesá hodnota frekvence, při které se vedení chová jako elektricky dlouhé. To souvisí s vyšším útlumem kabelu (nad 13dB).

U kabelu SYKFY podle grafu na obr. 3.7 vidíme, že stejně jako u obr. 3.3 – 3.6 dochází s rostoucí frekvencí k poklesu hodnot vstupní impedance na úroveň vlnové impedance. Tento pokles není tolik výrazný, jako u kabelů TCEPKPFLE, včetně při zakončení $Z = 150 \Omega$. Vedení se začíná chovat jako elektricky dlouhé až při největší frekvenci.

S rostoucí délkou se snižují i hodnoty vstupní impedance u jednotlivých zátěží, což jde nejlépe vidět na hodnotách vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE do frekvence 200kHz při zátěži $Z = 600 \Omega$ v tabulce 3.11 a na obr. 3.8. Porovnání hodnot Z_i při zátěži 400 Ω a 150 Ω je uvedeno v příloze C, tabulka 12, obr. 1 – 2.

f [kHz]	$Z_1 (Z = 600\Omega)$			
	Vedení G	Vedení D	Vedení E	Vedení N
10	422	355	325	306
20	344	278	254	240
50	243	196	182	178
75	205	170	162	158
100	182	155	149	148
150	155	136	134	133
200	138	126	124	124

Tabulka 3.11: Hodnoty vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE v závislosti na délce l



Obr. 3.8: Průběh vstupní impedance v závislosti na délce l při zátěži $Z = 600\Omega$

3.4 Vstupní impedance vedení nakrátko a naprázdno konečné délky

U vedení nakrátko a naprázdno vycházíme ze vztahů (2.30) a (2.33). Za vlnovou impedancí dosadíme vztahy (3.7) pro TCEPKPFLE kabel a (3.8) pro SYKFY kabel. Za hyperbolický kotangens a tangens míry přenosu dosadíme hodnoty vypočítané z hyperbolických funkcí sinus a kosinus míry přenosu z přílohy B.

Konečný vztah \bar{Z}_{10} (3.17) pro kabel TCEPKPFLE a (3.18) pro kabel SYKFY při vedení naprázdno:

$$\bar{Z}_{10} = [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (m - jn) \quad (3.17)$$

$$\bar{Z}_{10} = [(153,419 - j \cdot 153,419) \cdot f^{-0,089}] \cdot (o - jp) \quad (3.18)$$

kde $(m - jn)$ a $(o - jp)$ jsou komplexní hodnoty $\coth(\bar{\gamma} \cdot l)$.

Konečný vztah \bar{Z}_{1k} (3.19) pro kabel TCEPKPFLE a (3.20) pro kabel SYKFY při vedení nakrátko:

$$\bar{Z}_{1k} = [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot f^{-0,232}] \cdot (q - jr) \quad (3.19)$$

$$\bar{Z}_{1k} = [(153,419 - j \cdot 153,419) \cdot f^{-0,089}] \cdot (s - jt) \quad (3.20)$$

kde $(q - jr)$ a $(s - jt)$ jsou komplexní hodnoty $\tanh(\bar{\gamma} \cdot l)$.

V tabulce 3.12 jsou vypočtené hodnoty \bar{Z}_{10} a \bar{Z}_{1k} kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km. Hodnoty \bar{Z}_{10} a \bar{Z}_{1k} ostatních délek kabelu TCEPKPFLE a kabelu SYKFY jsou v příloze C, tabulka 8 až 11. Jednotlivé průběhy \bar{Z}_{10} a \bar{Z}_{1k} jsou vyneseny na obr 3.9 – 3.13.

Př. vedení G:

$$f = 131,1 \text{ kHz}, \coth(\bar{\gamma} \cdot l) = 1,2924 - j0,0120, \tanh(\bar{\gamma} \cdot l) = 0,7737 + j0,0072$$

Vedení naprázdno:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{10} &= [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot 131100^{-0,232}] \cdot (1,2924 - j0,0120) = \\ &= (96,522 - j96,552) \cdot (1,2924 - j0,0120) \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{10} = 123,581 - j125,907 \Omega$$

$$|Z_{10}| = \sqrt{123,581^2 + (-125,907)^2} \doteq 177 \Omega$$

Vedení nakrátko:

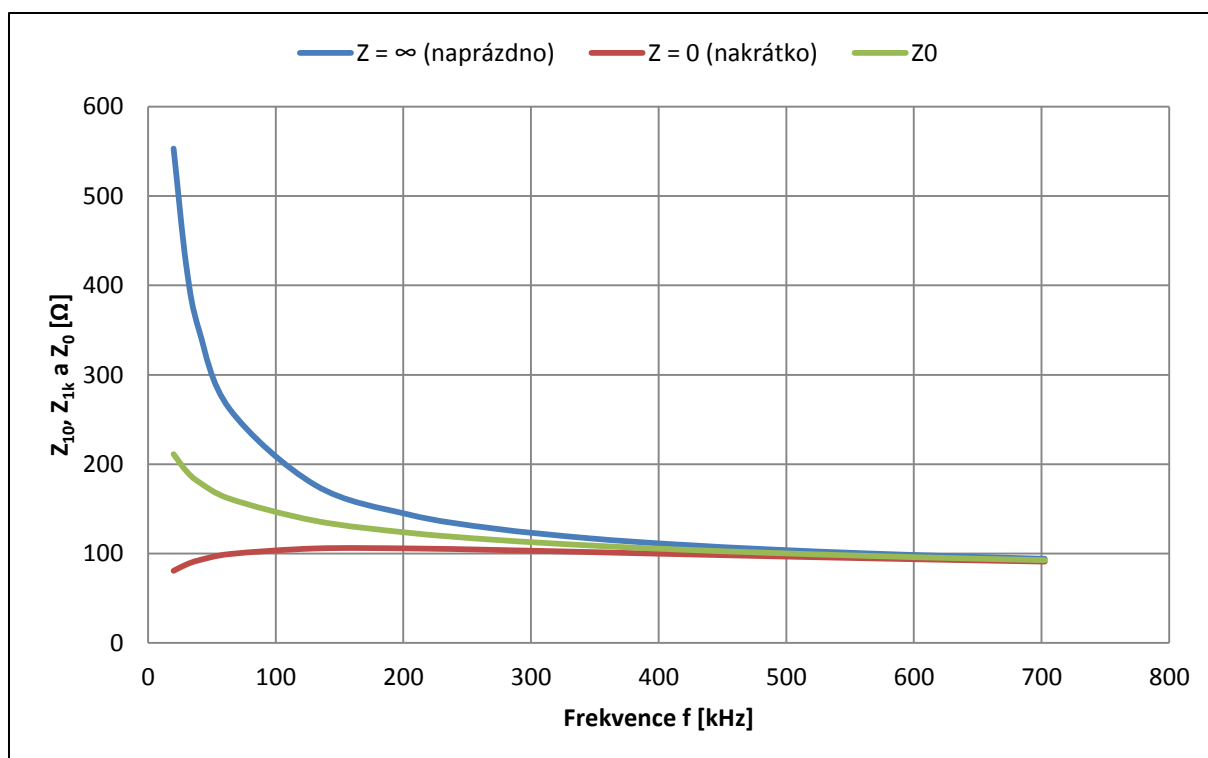
$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1k} &= [(1485,407 - j \cdot 1485,407) \cdot 131100^{-0,232}] \cdot (0,7737 + j0,0072) = \\ &= (96,522 - j96,552) \cdot (0,7737 + j0,0072) \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{1k} = 75,375 - j73,983 \Omega$$

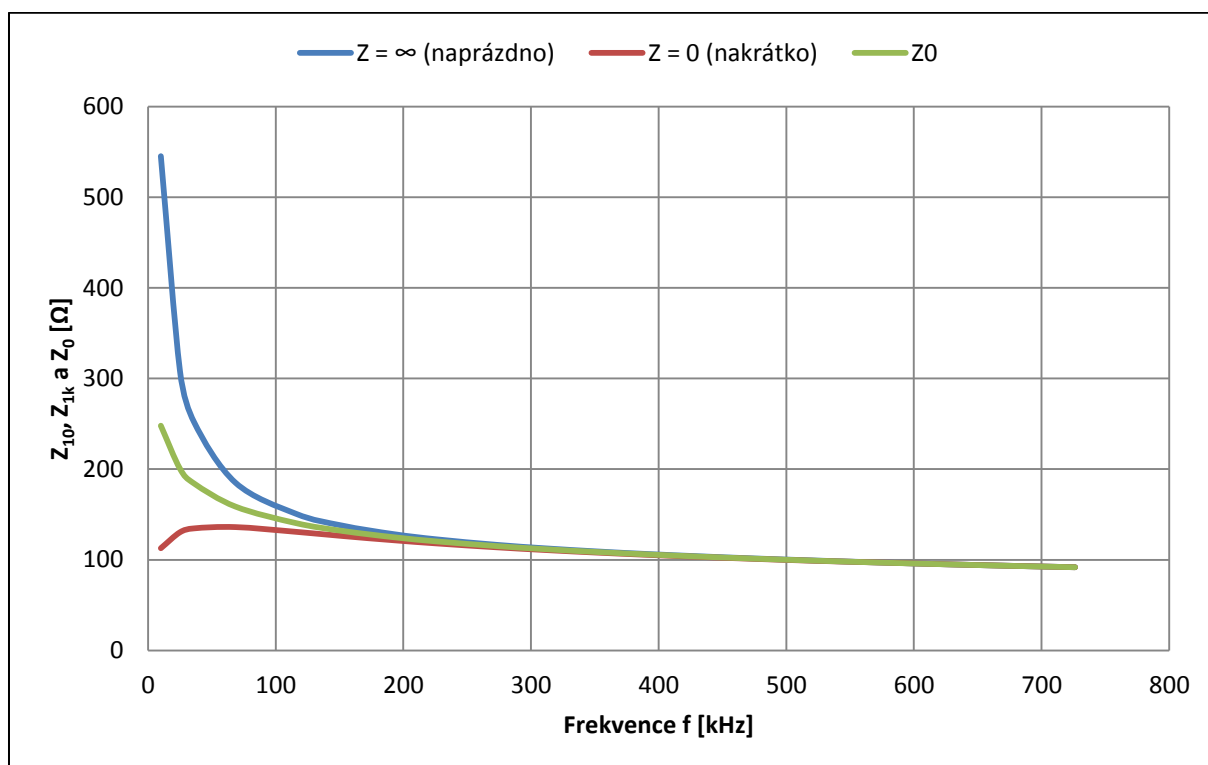
$$|Z_{1k}| = \sqrt{75,375^2 + (-73,983)^2} \doteq 106 \Omega$$

$f [\text{kHz}]$	$Z = \infty$ (naprázdno)			$Z = 0$ (nakrátko)		
	$R_e(Z_l) [\Omega]$	$I_m(Z_l) [\Omega]$	$ Z_{l0} [\Omega]$	$R_e(Z_l) [\Omega]$	$I_m(Z_l) [\Omega]$	$ Z_{lk} [\Omega]$
20	385,946	-397,230	553	57,880	-56,090	81
30	293,448	-302,338	421	62,909	-61,059	88
40	243,625	-250,639	350	66,309	-64,453	92
64	182,563	-187,232	262	71,155	-69,380	99
131,1	123,581	-125,907	176	75,375	-73,983	106
204,26	100,811	-102,214	144	75,222	-74,190	106
270,86	89,994	-90,966	128	73,925	-73,135	104
345,9	82,358	-83,040	117	72,115	-71,523	102
413,8	77,581	-78,094	110	70,448	-69,985	99
489,5	73,619	-74,003	104	68,672	-68,316	97
562,1	70,672	-70,969	100	67,090	-66,809	95
637,9	68,188	-68,419	97	65,570	-65,349	93
702,5	66,413	-66,601	94	64,376	-64,194	91

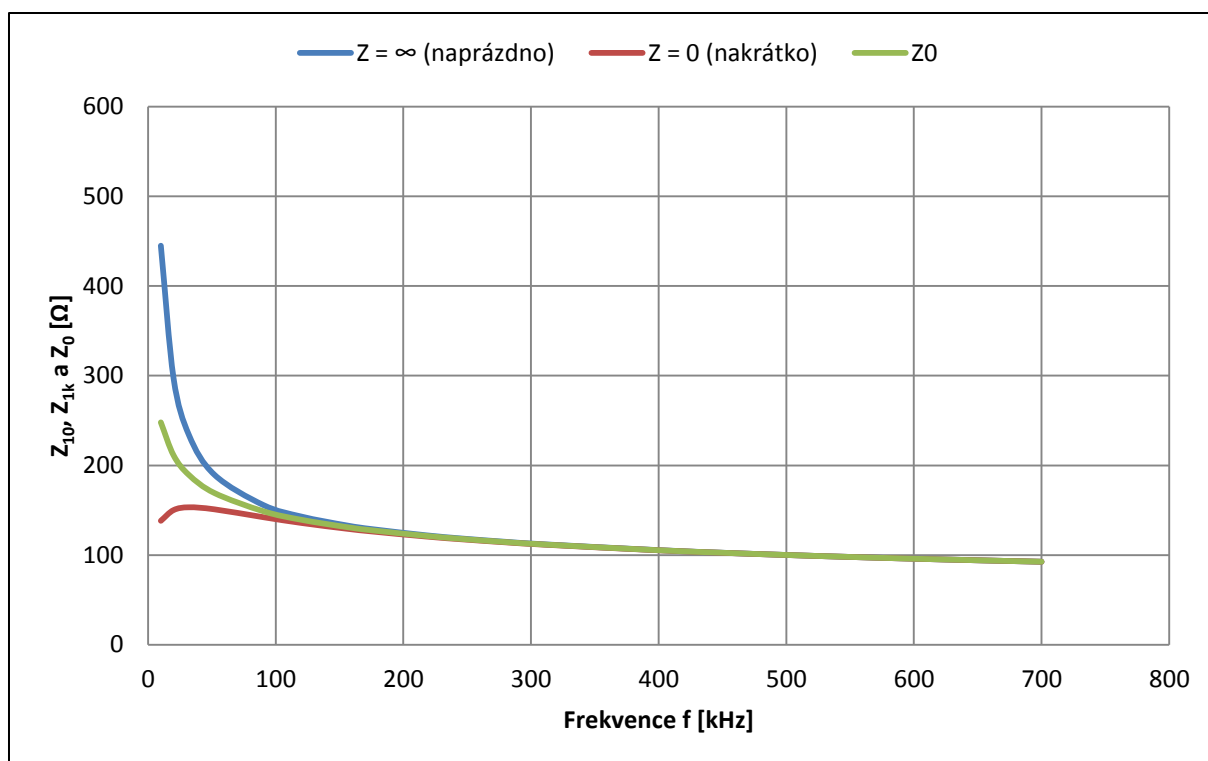
Tabulka 3.12: Vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



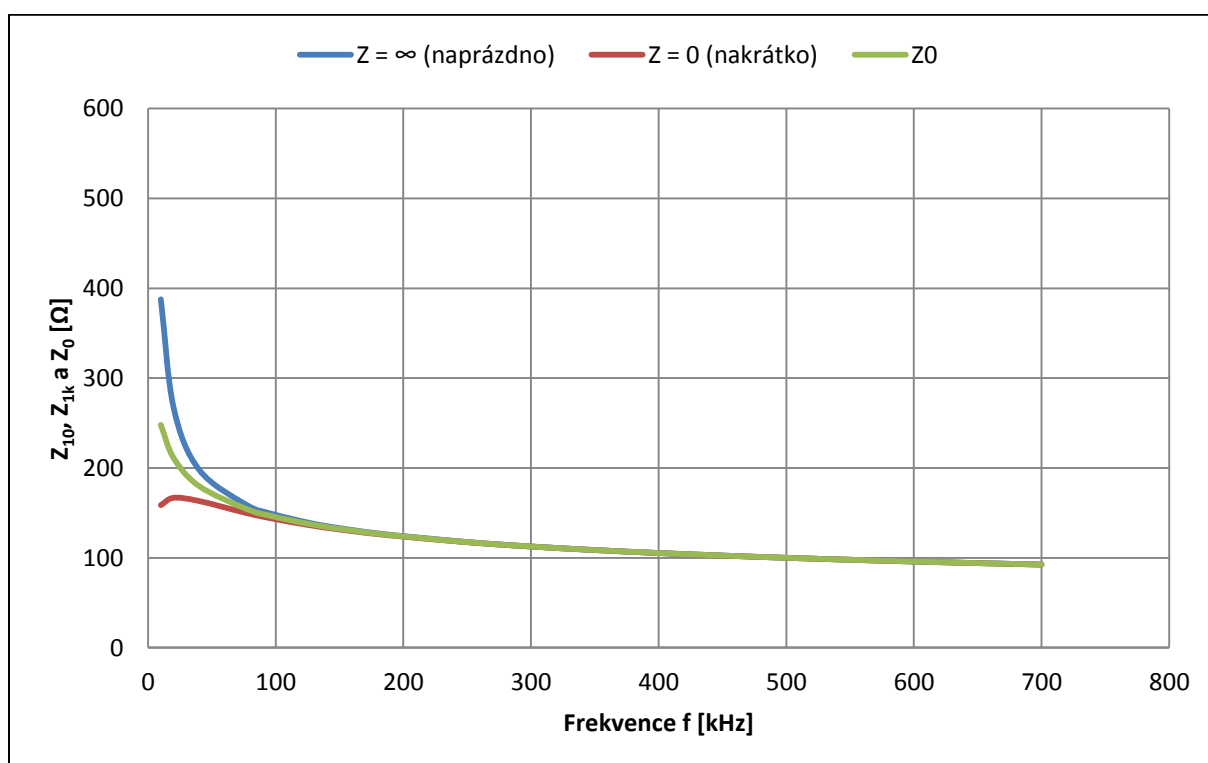
Obr. 3.9: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



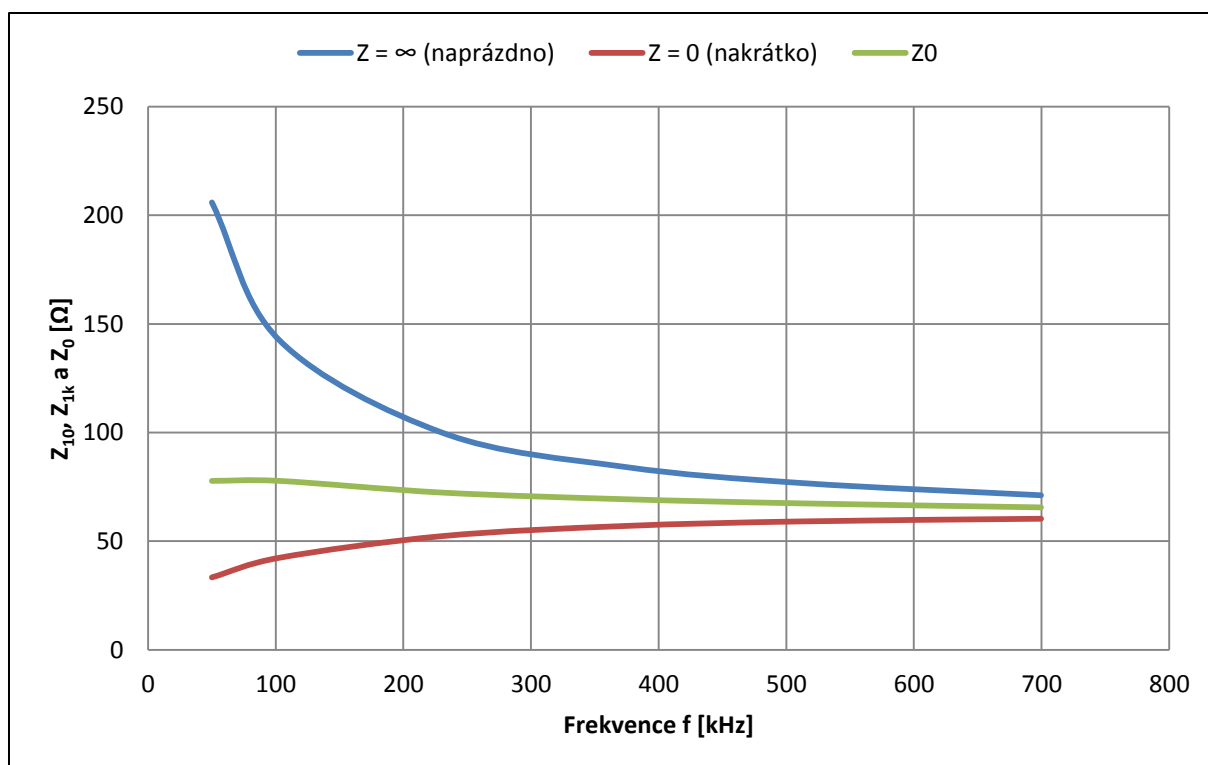
Obr. 3.10: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km



Obr. 3.11: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km



Obr. 3.12: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km



Obr. 3.13: Průběh vstupní impedance naprázdno a nakrátko kabelu SYKFY

Na obr. 3.9 – 3.12 opět platí, že s rostoucí frekvencí se vedení chová jako elektricky dlouhé vedení. A frekvence, od které se vedení chová jako elektricky dlouhé, se s rostoucí délkou snižuje. Se vzrůstající délkou hodnoty vstupní impedance naprázdno klesají a hodnoty vstupní impedance nakrátko stoupají do té doby, než se vedení chová jako elektricky dlouhé.

Kabel SYKFY se podle na obr. 3.13 začíná chovat jako elektricky dlouhé až při nejvyšší frekvence, takže opět nedochází k tak prudkému poklesu a růstu vstupní impedance na úroveň vlnové impedance jako u kabelu TCEPKPFLE.

Z obrázků vstupní impedance 3.3 – 3.8 a 3.9 – 3.13 platí, že vstupní impedance závisí na zakončení, typu vedení a délce vedení l .

3.5 Programová realizace mat. modelu

3.5.1 Programové prostředky

Součástí praktické části bakalářské práce byla i programová realizace matematické modelu. Program jsem vytvářel v program Netbeans IDE 7.1.2 v programovacím jazyku Java na platformě Java Standard Edition (Java SE) za pomoci knihovny Java Swing pro grafické rozhraní. Pro vykreslování grafů jsem použil knihovnu JFreeChart.

3.5.2 Programovací jazyk Java

Java je objektově orientovaný jazyk od firmy Sun Microsystems, později koupený firmou Oracle, který je velmi podobný C++. První verze vyšla v roce 1995 a vyvinula se z jazyka Oak. Je to jednoduchý, bezpečný, robustní, kompletně objektově orientovaný a hardwarově nezávislý programovací jazyk na vysoké úrovni. Díky hardwarové nezávislosti se může program vytvořený v jazyce Java pod Windows spustit i v Linuxu, pokud je zde k dispozici Java Runtime Environment (JRE), což je prostředí pro běh programů v Javě.

Existuje několik edicí technologie Javy. Pro vytvoření aplikací na stolních aplikacích slouží Java Standard Edition (Java SE). Java Micro Edition (JME) slouží pro psaní aplikací na mobilních zařízeních a Java Enterprise Edition, která je založena na Java SE, se používá pro psaní podnikových aplikací.[7][9]

3.5.3 Knihovna Java Swing a JFreeChart

Pro interakci mezi uživatelem a komponentami grafického rozhraní jsem využil knihovnu Swing na platformě Java. Knihovna Swing obsahuje prvky jako tlačítka, okna, dialogy, textová pole atd. Třídy knihovny Swing se importují pomocí balíčku *javax.swing.**. [8]

Pro vytvoření programu jsem využil strukturu MVC, kdy je uživatelské rozhraní rozdělené do Modelu, View a Controlleru. View nám zobrazuje grafické rozhraní a komunikuje s Modelem pro získání informací. View poskytuje metody, které zpracovává Controller při nějakém uživatelském požadavku (stisk tlačítka). Controller spolupracuje jak s View tak i Modelem. V Modelu jsou uloženy informace, s kterými aplikace pracuje. [6]

Pro porovnání vypočtených hodnot vykresluju grafy pomocí knihovny JFreeChart pro platformu Java. Tato knihovna je zcela zdarma, jelikož spadá pod licenci LGPL, která povoluje použití ve vlastních aplikacích. [5]

3.5.4 Výstupy aplikace

Nejprve je třeba určit hodnotu měrného odporu R a délky vedení l zadáním hodnot měrného odporu vodiče, poloměru žíly, odporu smyčky vedení a měrné kapacity C . Pak zadáme vztah pro matematické vyjádření Z_0 a hodnotu zátěže vedení Z . Pokud zůstane hodnota zátěže prázdná, bude se počítat Z_l pro vedení naprázdno, při hodnotě 0 pro vedení nakrátko. Pak se zadají hodnoty frekvence f a napětíové úrovně L_l a to buď ručně, nebo načtením ze souboru. Pak už stačí nechat vypočítat sekundární parametry a vstupní impedanci a zobrazit si graf porovnávající hodnoty Z_l , který lze pak uložit jako obrázek. Všechny dosazované hodnoty musí být s desetinnou tečkou.

Spustitelný program s názvem `vstupni_impedance.jar` je umístěn v příloze F. Zdrojové kódy z programu Netbeans jsou v příloze G. Uživatelská příručka s návodem na obsluhu programu je v příloze H pod názvem `uzivatelska_prirucka.pdf`.

Vstupní impedance

Primární parametry

Zadejte vlastnosti materiálu

Měrný odpor vodiče q: 0.01785 mm²/mm

Poloměr žíly vodiče r: 0.2 mm

Zadejte odpor smyčky a kapacitu

Odpor smyčky Rs: 177 Ohm

Měrná kapacita C: 46.64966 nF/km

Vypočet odporu a délky vedení

Měrný odpor R: 142.0458 Ohm/km

Délka l: 0.623 km

Matematické vyjádření Z0 a zátěž vedení

$Z_0 = a \cdot b$ a: 2101 b: -0.232

Zátěž Z: 600 [Ohm] (nic = naprázdno, 0 = nakrátko)

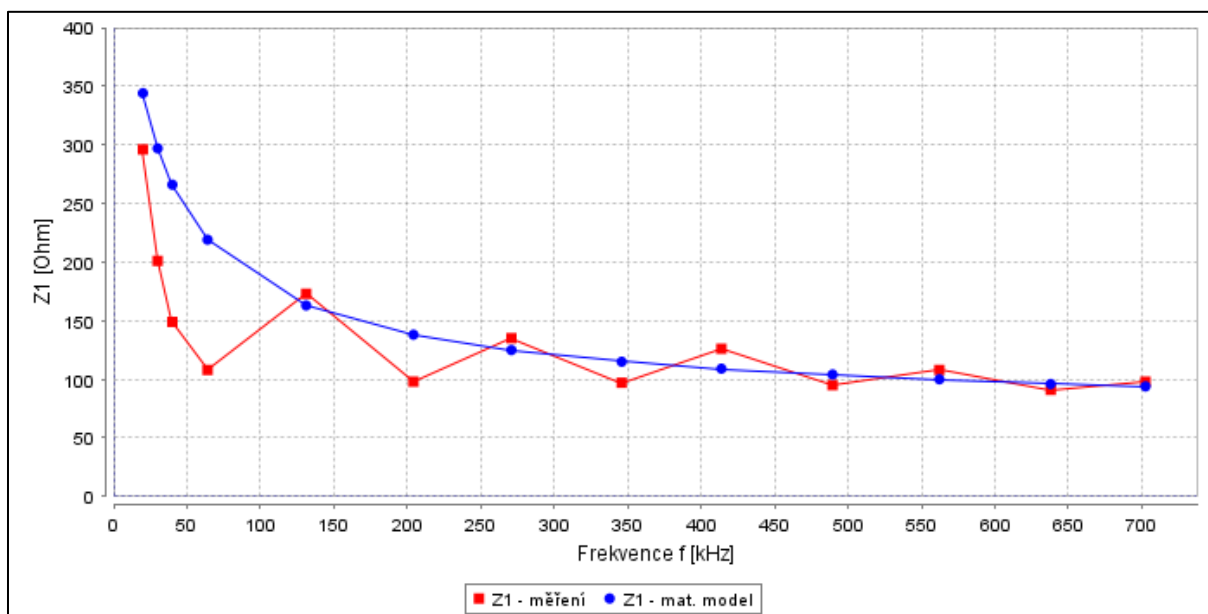
Výpočet vstupní impedance

Frekvence [kHz]	Sekundární parametry [Z0] [Ohm]	Měrný útlum [Np/km]	Měrný fázový posuv [rad/km]	Vstupní Impedance L1 [dBu]	Z1 - měření [Ohm]	Z1 - mat.model [Ohm]
f1: 20	f1: 211.0	0.645	0.645	f1: -3.6	296.0	344.0
f2: 30	f2: 192.0	0.79	0.79	f2: -6	201.0	297.0
f3: 40	f3: 180.0	0.913	0.913	f3: -8	149.0	266.0
f4: 64	f4: 161.0	1.154	1.154	f4: -10.3	108.0	219.0
f5: 131.1	f5: 137.0	1.652	1.652	f5: -7	173.0	163.0
f6: 204.2	f6: 123.0	2.062	2.062	f6: -11	98.0	138.0
f7: 270.8	f7: 115.0	2.374	2.374	f7: -8.7	135.0	125.0
f8: 345.9	f8: 109.0	2.683	2.683	f8: -11.1	97.0	115.0
f9: 413.8	f9: 105.0	2.935	2.935	f9: -9.2	126.0	109.0
f10: 489.5	f10: 101.0	3.192	3.192	f10: -11.3	95.0	104.0
f11: 562.1	f11: 97.0	3.421	3.421	f11: -10.3	108.0	100.0
f12: 637.9	f12: 95.0	3.644	3.644	f12: -11.6	91.0	96.0
f13: 702.5	f13: 92.0	3.824	3.824	f13: -11	98.0	94.0
f14: 0	f14: 0.0	0.0	0.0	f14: 0	0.0	0.0
f15: 0	f15: 0.0	0.0	0.0	f15: 0	0.0	0.0
f16: 0	f16: 0.0	0.0	0.0	f16: 0	0.0	0.0
f17: 0	f17: 0.0	0.0	0.0	f17: 0	0.0	0.0
f18: 0	f18: 0.0	0.0	0.0	f18: 0	0.0	0.0
f19: 0	f19: 0.0	0.0	0.0	f19: 0	0.0	0.0
f20: 0	f20: 0.0	0.0	0.0	f20: 0	0.0	0.0

Odpor a délka Načíst frekvence Načíst úroveň Sekundární parametry **Vstupní impedance** Graf

All Rights Reserved (c) 2011/2012 - SIM515

Obr. 3.14: Program na výpočet vstupní impedance



Obr. 3.15: Grafický výstup vstupní impedance

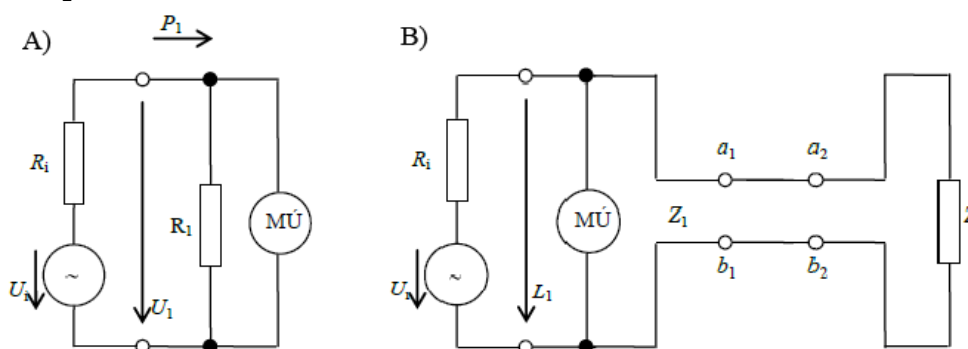
4 Experimentální ověření mat. modelu

Cílem praktického měření je ověření hodnot vstupní impedance z matematického modelu. K určení vstupní impedance pomocí měření je třeba změřit napět'ovou úroveň na začátku vedení různě zakončeného vedení. Vedení je zakončeno stejně jako u matematického modelu, tedy vedení naprázdno, nakrátko a se zátěží $600\ \Omega$, $400\ \Omega$ a $150\ \Omega$.

4.1 Použité přístroje

Zjišťování a nastavování frekvencí f a frekvenčního rozsahu jsem prováděl na měřicím systému Metex MS 9170. Na nízkofrekvenčním milivoltmetru Instek GVT 417B jsem odečítal hodnoty napět'ové úrovně L_I a přepínal úrovněový rozsah pro snadnější odečet hodnot L_I . Pro nastavení zátěží $600\ \Omega$, $400\ \Omega$ a $150\ \Omega$ jsem použil odporovou dekádu.

4.2 Postup měření



Obr. 4.1: Schéma zapojení A a B

Nejprve se zapojí obvod podle zapojení A na obr. 4.1, kdy se propojí generátor a měřič úrovně (milivoltmetr). Ke generátoru se připojí odpor R_l s hodnotou $600\ \Omega$. Při tomto zapojení nastavíme na generátoru vnitřní odpor R_i na $600\ \Omega$, přepínač gate time na 0,1 s, pro zvyšování frekvence v rámci setin. Rozsah frekvence nastavíme na X10k, který v průběhu měření měníme na X100k a X1m pro měření ve vyšších frekvencích. Na milivoltmetru nastavíme úrovněový rozsah 0 dB. Poté zapneme generátor, nastavíme na něm hodnotu frekvence 1 kHz a upravíme úroveň (amplitudu) generátoru tak, aby na milivoltmetru byla napět'ová úroveň nulová. Takto nastavená úroveň generátoru zůstává po celou dobu měření stejná. Nakonec přepneme rozsah milivoltmetru na +10dB.

Po nastavení generátoru a milivoltmetru se připojí vedení podle zapojení B na obr. 4.1. K měřiči úrovně se připojí začátek vedení a_1 a b_1 a konec vedení a_2 a b_2 se nechá rozpojený. Při rozpojeném vedení se určí rezonanční kmitočty vedení z maxim a minim napět'ové úrovně L_I . Při vedení nakrátko, kdy jsou konce vedení a_2 a b_2 zkratované, změříme L_I na stejných kmitočtech jako u vedení naprázdno. Na těchto kmitočtech se určí i L_I , kdy jsou konce vedení a_2 a b_2 připojeny k zátěži Z .

4.3 Kmitočtový průběh vstupní impedance

Nejprve si upravíme vztah pro absolutní úroveň napětí na začátku vedení L_I :

$$10^{\frac{L_1}{20}} = \frac{2 \cdot U_1}{U_i} \quad (4.1)$$

Vstupní impedance je podle vztahu (2.22) daná poměrem vstupního napětí a vstupního proudu.

Vstupní proud (4.2) si určíme ze zapojení A podle obr. 4.1:

$$I_1 = \frac{U_i}{R_i + R_1} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_i - U_1}{R_i} [A] \quad (4.2)$$

Dosazením I_1 do vztahu (2.22) a následným rozšířením zlomku a dosazením upraveného vztahu pro L_I (4.1) dostaneme vztah pro výpočet Z_I (4.3). Ze změřené napěťové úrovně L_I a vnitřního odporu generátoru R_i vypočteme hodnoty Z_I . Ty jsou společně s hodnotami L_I a vlnové impedance podle (2.7) uvedeny v tabulce 4.1 a 4.2 pro kabel TCEPKPFLE délky 0,623 km a SYKFY. Hodnoty ostatních délek kabelu TCEPKPFLE jsou v příloze D, tabulky 11 – 14. Průběhy Z_I všech kabelů jsou znázorněny na obr. 4.1 – 4.5.

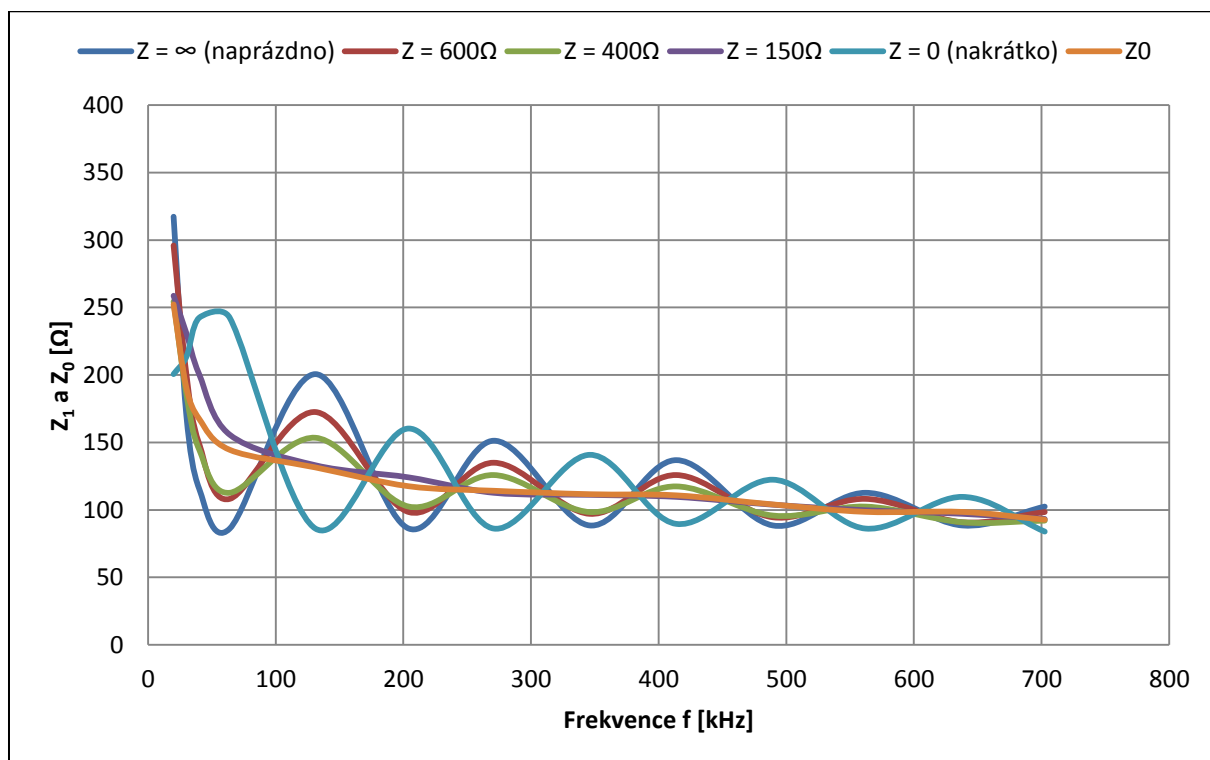
$$Z_I = \frac{U_1}{I_1} = R_i \cdot \frac{U_1}{U_i - U_1} \cdot \frac{\frac{2}{U_i}}{\frac{2}{U_i}} = R_i \cdot \frac{\frac{2 \cdot U_1}{U_i}}{2 - \frac{2 \cdot U_1}{U_i}} = R_i \cdot \frac{10^{\frac{L_1}{20}}}{2 - 10^{\frac{L_1}{20}}} [\Omega] \quad (4.3)$$

R_i [Ω]	600										
Z [Ω]	∞ (naprázdno)		600		400		150		0 (nakrátko)		
f	L_I	Z_I	L_I	Z_I	L_I	Z_I	L_I	Z_I	L_I	Z_I	Z_0
[kHz]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[Ω]
20	-3,2	317	-3,6	296	-4,5	254	-4,4	259	-6	201	252
30	-7,1	170	-6	201	-6,5	186	-5,1	231	-5,6	213	190
40	-9,8	116	-8	149	-8,2	145	-6	201	-4,8	242	168
64	-12	86	-10,3	108	-10	113	-7,7	156	-4,8	242	145
131,1	-6	201	-7	173	-7,8	153	-8,8	133	-12	86	131
204,26	-12	86	-11	98	-10,7	102	-9,3	124	-7,5	160	118
270,86	-7,9	151	-8,7	135	-9,2	126	-10	113	-12	86	114
345,9	-11,8	88	-11,1	97	-11	98	-10,1	111	-8,4	141	112
413,8	-8,6	137	-9,2	126	-9,7	117	-10,2	110	-11,7	90	111
489,5	-11,8	88	-11,3	95	-11,2	96	-10,6	104	-9,4	122	104
562,1	-10	113	-10,3	108	-10,7	102	-10,9	100	-12	86	99
637,9	-11,8	88	-11,6	91	-11,6	91	-11,1	97	-10,2	110	99
702,5	-10,7	102	-11	98	-11,5	92	-11,4	93	-12,2	84	93

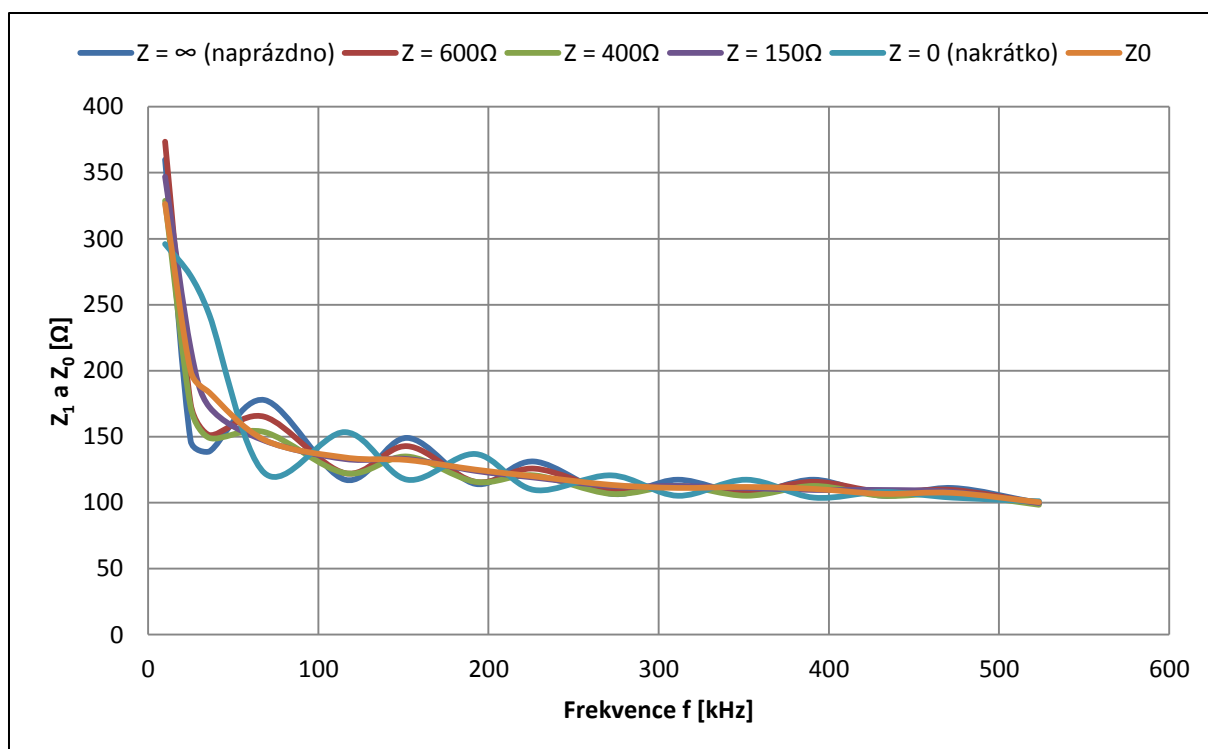
Tabulka 4.1: Stanovení vstupní impedance z měření kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km

R_i [Ω]	600										
Z [Ω]	∞ (naprázdno)		600		400		150		0 (nakrátko)		
f	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	Z_0
[kHz]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[Ω]
50	-13	76	-13	76	-13,1	75	-12,3	83	-12,6	80	78
102,8	-18,1	40	-16,9	46	-16,2	50	-14,2	65	-7,1	170	82
230,9	-10,4	107	-11	98	-11,3	95	-12,4	82	-16	52	74
372,9	-15	59	-14,8	60	-14,7	61	-14,2	65	-12,3	83	70
513	-13,1	75	-13,4	72	-13,5	71	-13,3	73	-14,8	60	67
699,6	-14,8	60	-14,8	60	-14,7	61	-14,5	62	-14,2	65	62

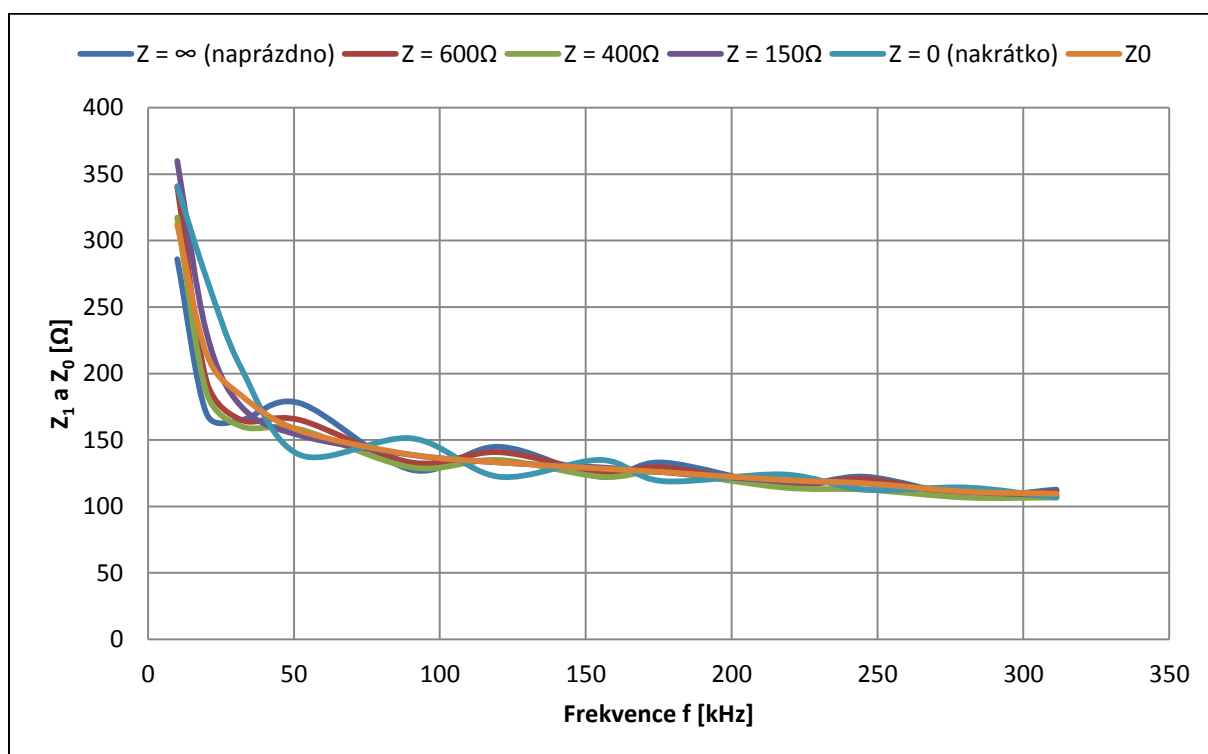
Tabulka 4.2: Stanovení vstupní impedance z měření kabelu SYKFY



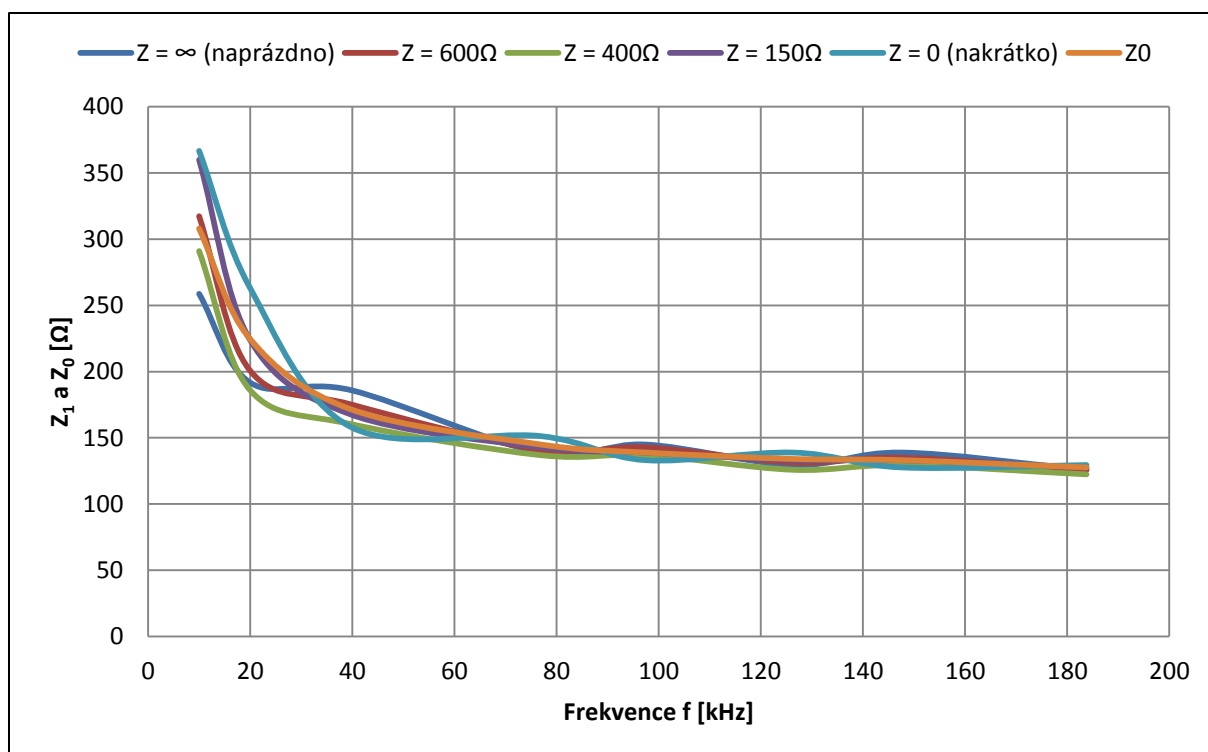
Obr. 4.2: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



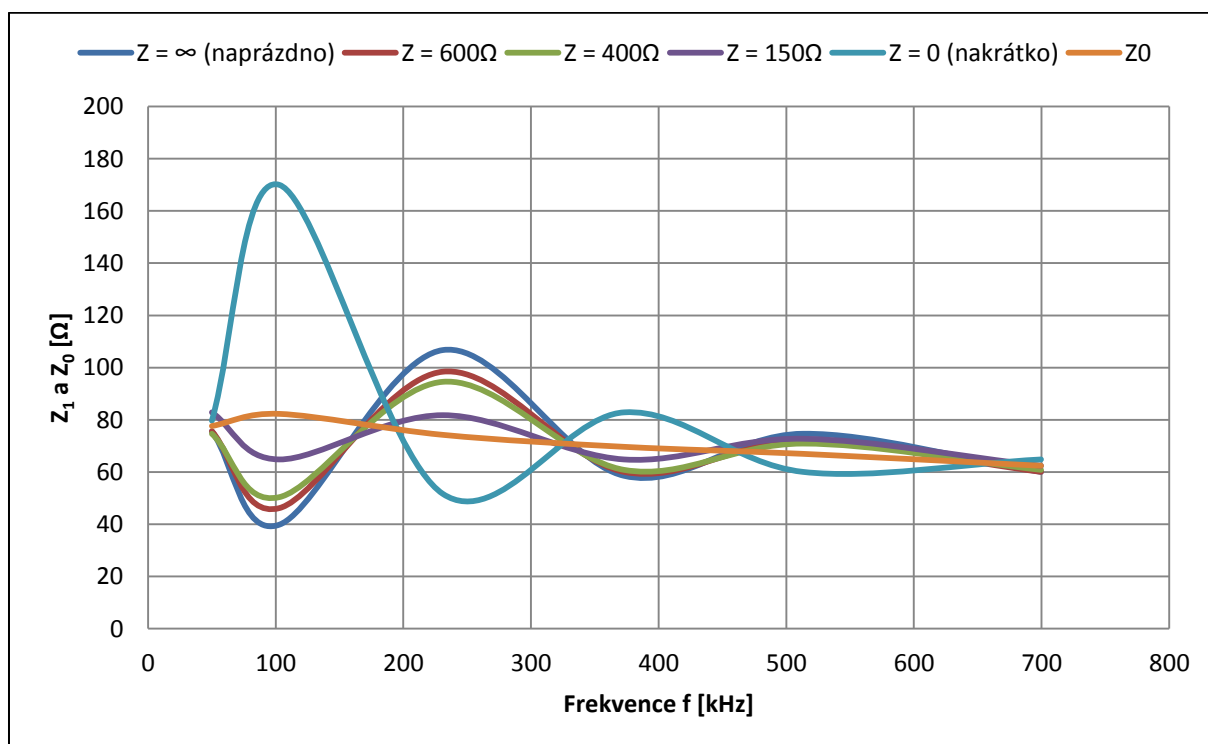
Obr. 4.3: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km



Obr. 4.4: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km



Obr. 4.5: Průběh vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km



Obr. 4.6: Průběh vstupní impedance kabelu SYKFY

Z průběhů vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délek G, D, E a N na obr. 4.2 – 4.5 lze vidět, že dochází k rozvlnění kolem průběhu vlnové impedance. To neplatí u vedení se zátěží 150 Ω ,

kdy se průběh Z_l rovná průběhu Z_0 . Se vzrůstající délkou kabelu TCEPKPFLE se zmenšuje hodnota maximální frekvence, na které jsme měřili, jelikož se od této frekvence už nemění hodnota L_l .

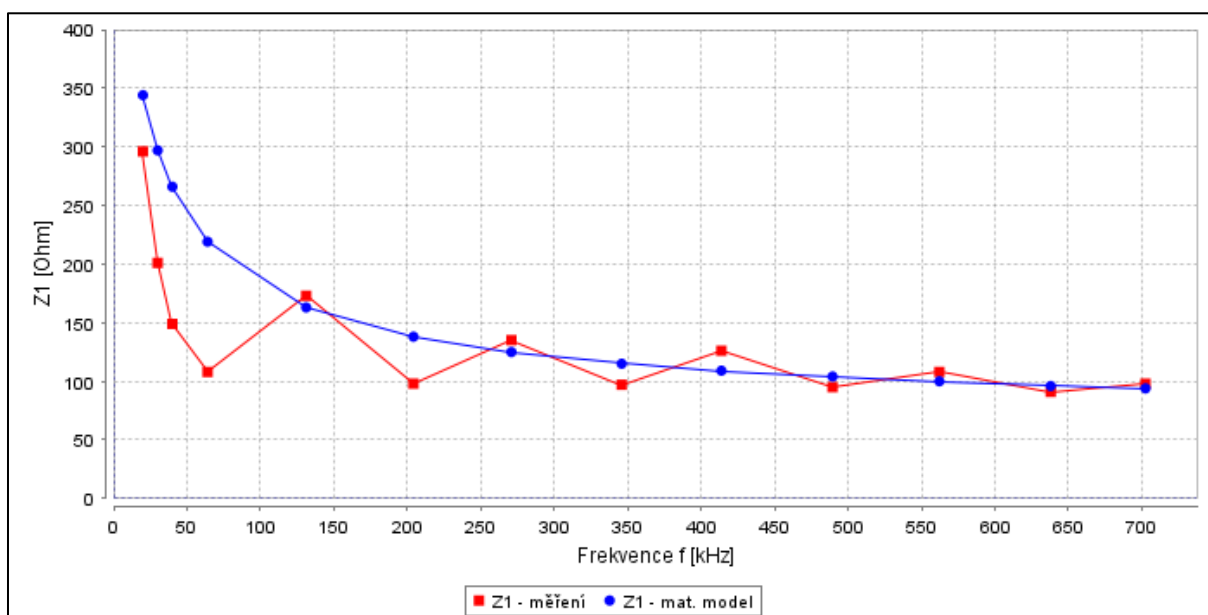
K rozvlnění Z_l kolem Z_0 dochází i u kabelu SYKFY podle obr. 4.6. A to i u vedení se zátěží 150Ω .

Stejně jako u matematického modelu se nám potvrdilo, že vstupní impedance závisí na zakončení, délce vedení l a typu vedení.

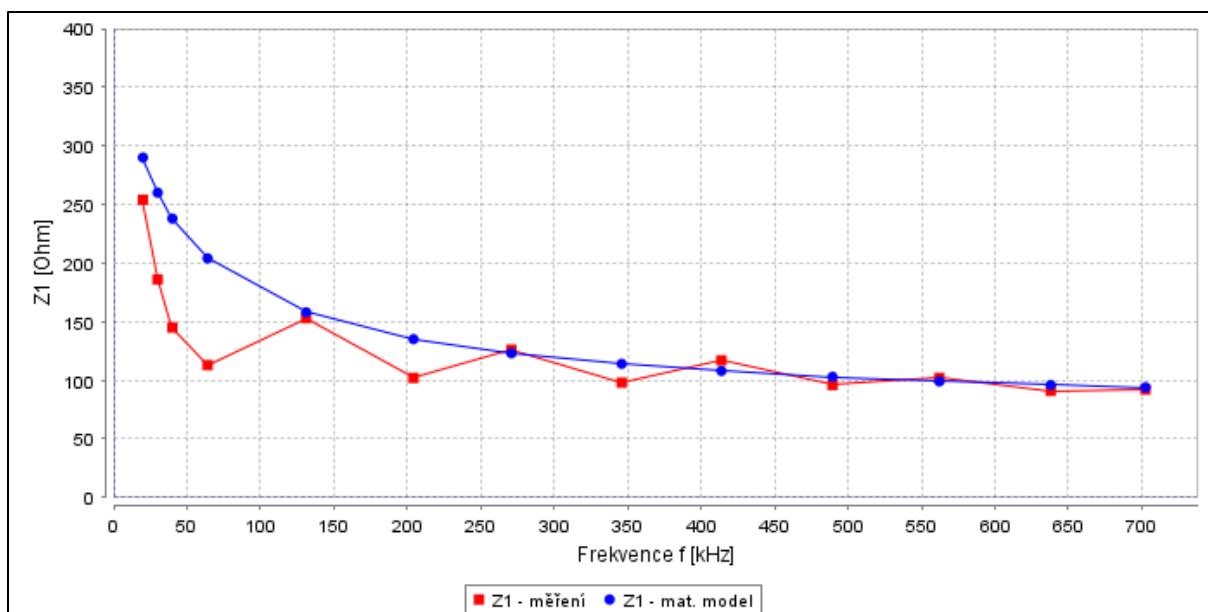
5 Porovnání hodnot mat. modelu a měření

Pro porovnání hodnot a průběhů matematického modelu a měření využijeme sestaveného programu na výpočet vstupní impedance. Vypočtené hodnoty v programu si ověříme podle tabulek v kapitole 3 a 4 a příloze C a D. Pro výpočet vstupní impedance z měření je třeba mít zadané hodnoty napěťové úrovně L_I .

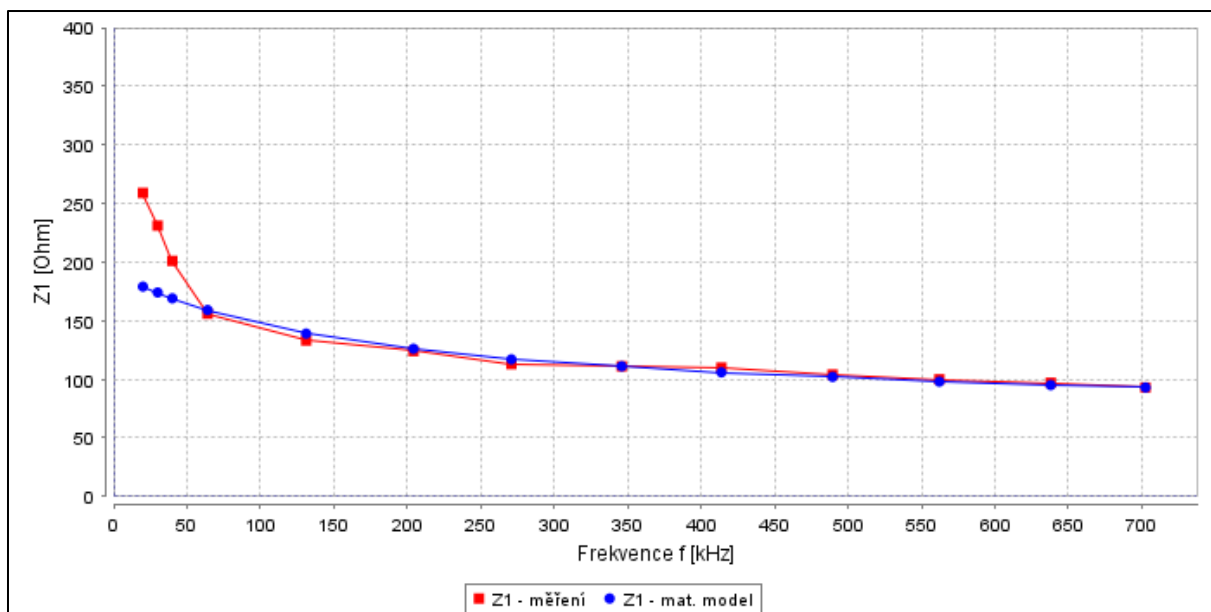
Pro matematický model je třeba mít zadané primární parametry R a C a délku vedení l , frekvenci, matematické vyjádření vlnové impedance a zátěž. Průběhy vstupní impedance jsou na obr. 5.1 – 5.10, pro kabel TCEPKPFLE délky 0,623 km a kabel SYKFY. Ostatní délky kabelu TCEPKPFLE jsou v příloze E.



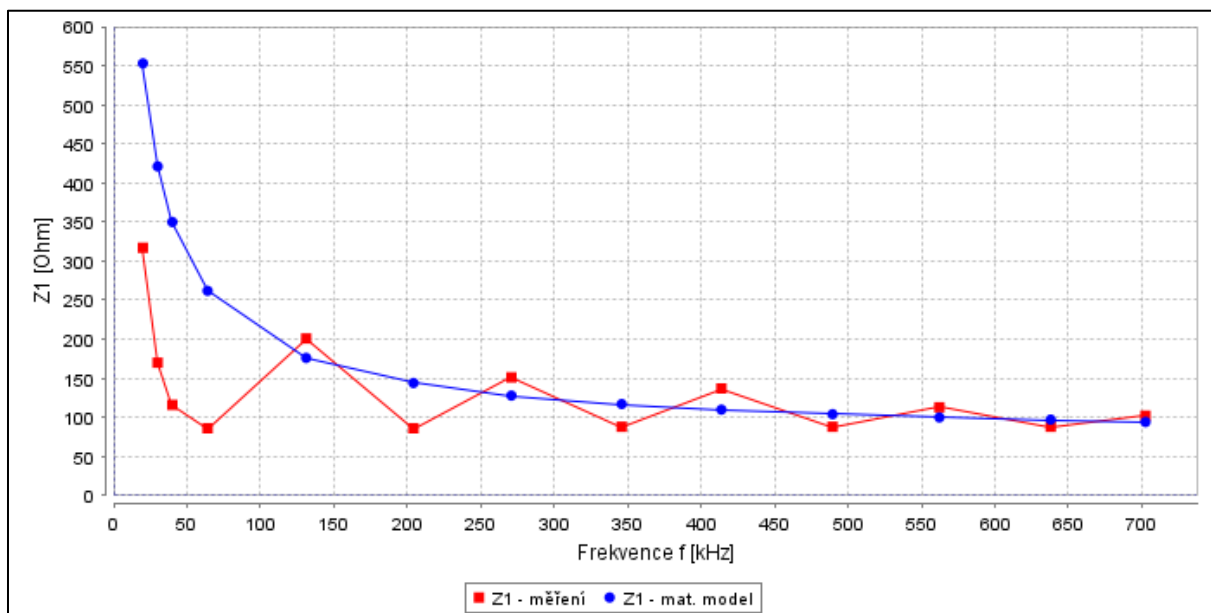
Obr. 5.1: Porovnání vstupní impedance při $Z = 600 \Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



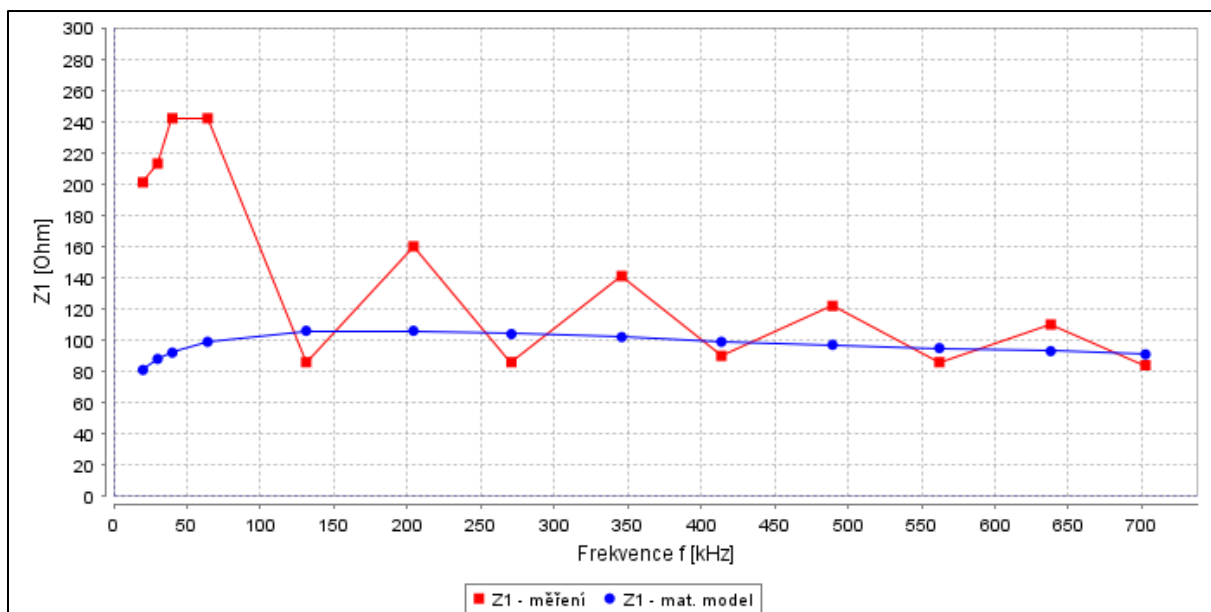
Obr. 5.2: Porovnání vstupní impedance při $Z = 400 \Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



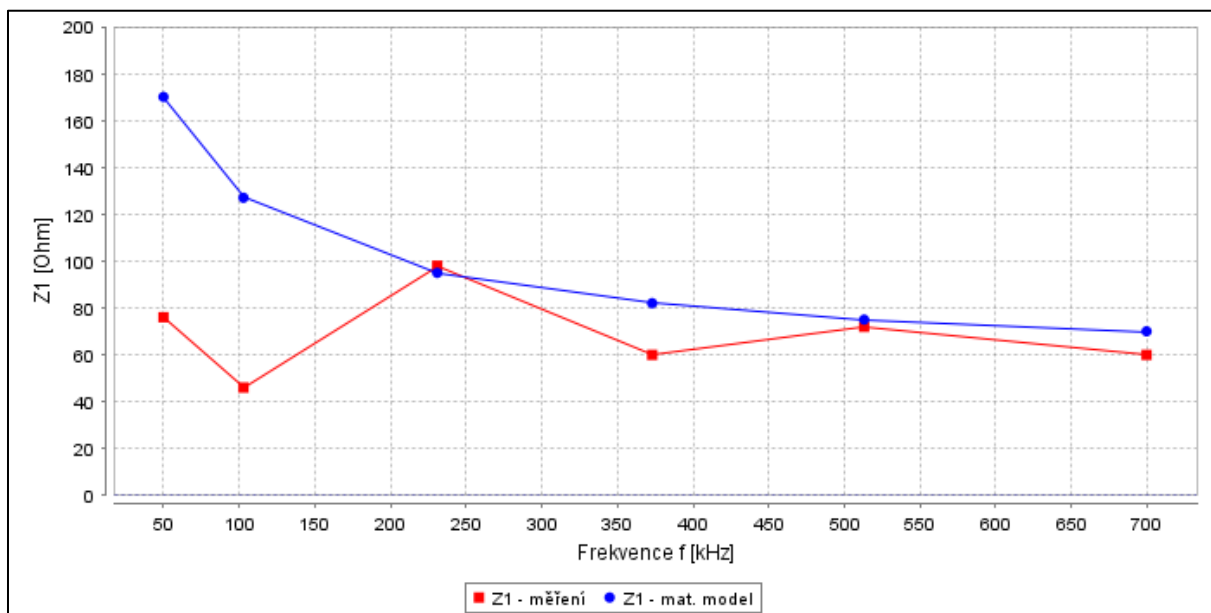
Obr. 5.3: Porovnání vstupní impedance při $Z = 150 \Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



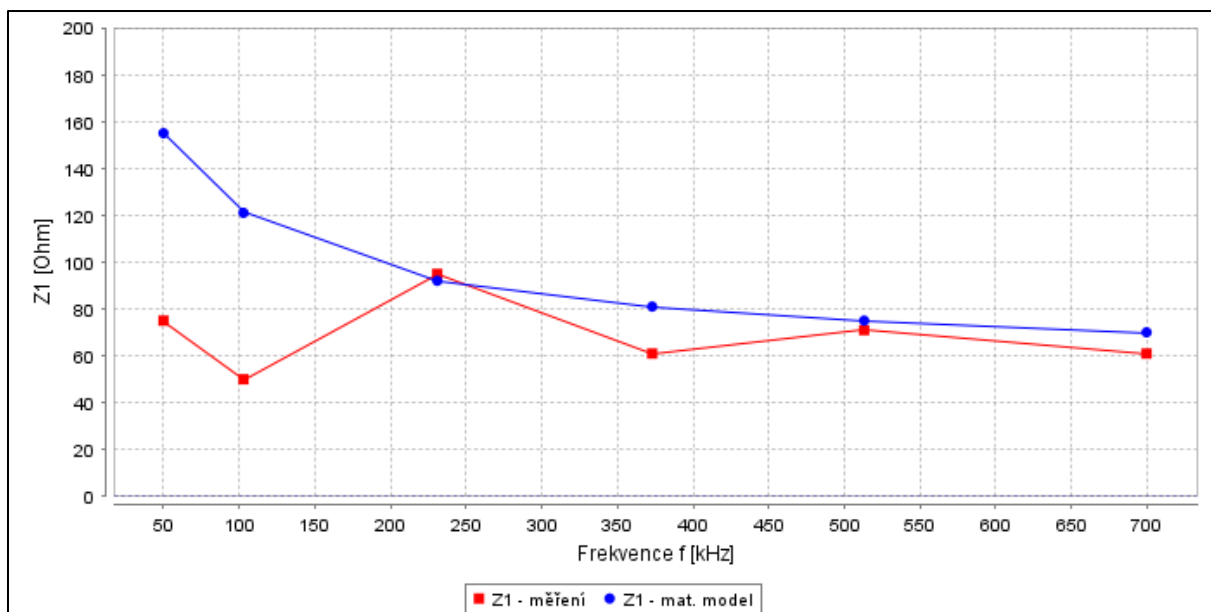
Obr. 5.4: Porovnání vstupní impedance při $Z = \infty \Omega$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



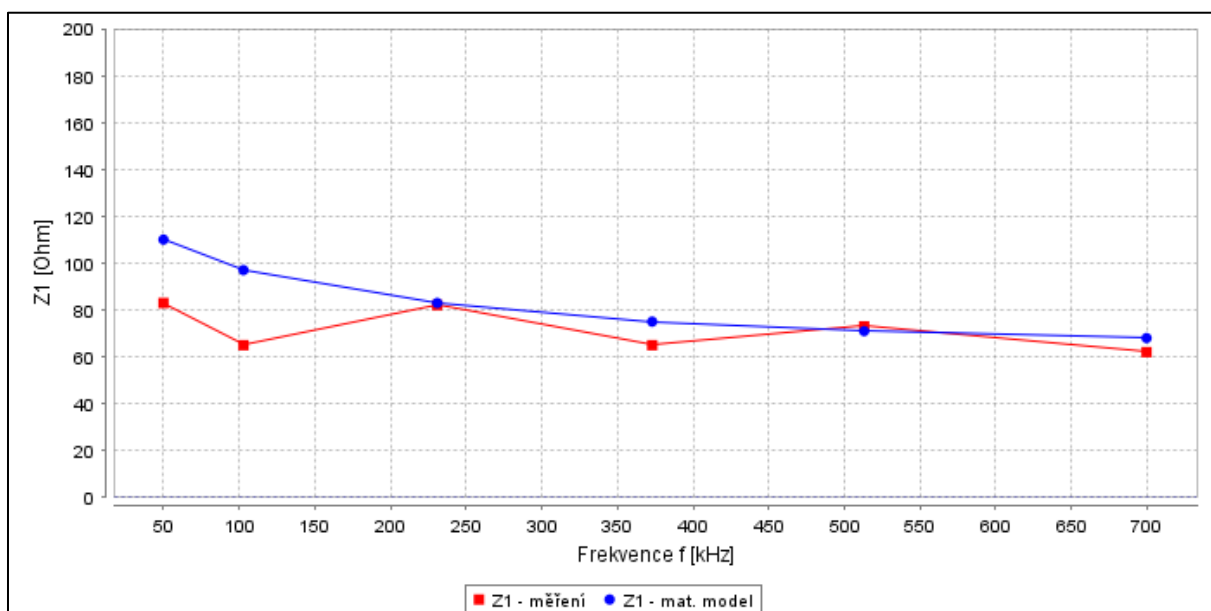
Obr. 5.5: Porovnání vstupní impedance při $Z = 0$ kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km



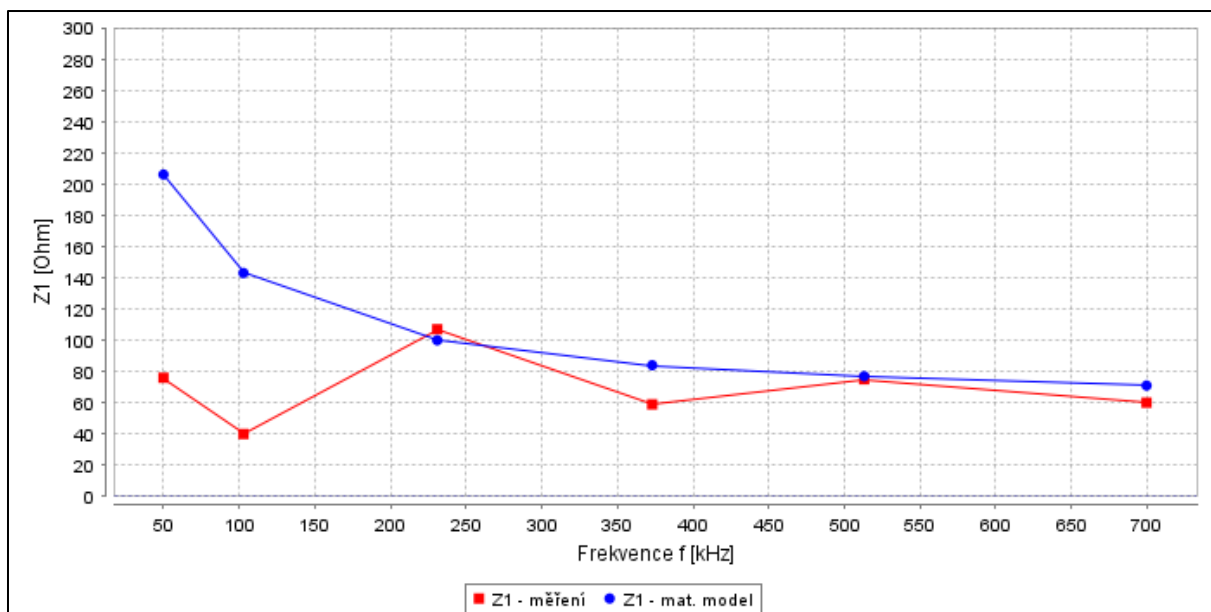
Obr. 5.6: Porovnání vstupní impedance při $Z = 600 \Omega$ kabelu SYKFY



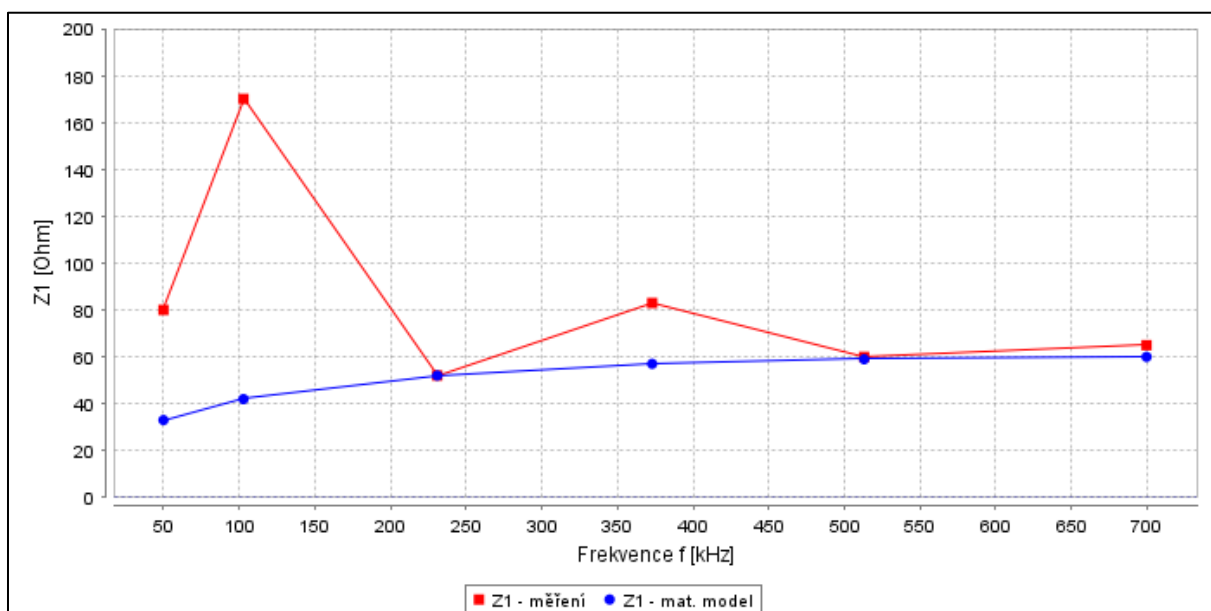
Obr. 5.7: Porovnání vstupní impedance při $Z = 400 \Omega$ kabelu SYKFY



Obr. 5.8: Porovnání vstupní impedance při $Z = 150 \Omega$ kabelu SYKFY



Obr. 5.9: Porovnání vstupní impedance při $Z = \infty$ kabelu SYKFY



Obr. 5.10: Porovnání vstupní impedance při $Z = 0$ kabelu SYKFY

6 Zhodnocení a závěr

Tato bakalářská práce měla za cíl vytvořit program na výpočet frekvenční charakteristiky vstupní impedance vedení a jeho experimentální ověření na reálném médiu. Závěrem si tedy porovnáme dosažené hodnoty vstupních impedancí. Uvedeme si přínosy této práce a její možné další využití.

Nejvíce práce zabralo sestavení matematického modelu pro 2 typy kabelu (TCEPKPFLE 15x4x0,4 mm a kabel SYKFY 2x2x0,4 mm). Nejprve je si třeba určit primární parametry R a C , délku vedení l z měření. Dále se určí matematické vyjádření vlnové impedance z průběhu vlnové impedance, která se určí ze vstupní impedance naprázdno a nakrátko. Nakonec se určí hyperbolické funkce míry přenosu. Matematický model se počítal přibližně pro frekvence do hodnoty 700 kHz, ale pro porovnání mat. modelu a měření je maximální frekvence daná nejvyšší frekvencí z měření u daného vedení.

Porovnáním průběhů Z_l na obr. 5.1 – 5.10 a v příloze E, vidíme, že se průběhy vstupní impedance přímo neshodují, ale shoduje se nám trend průběhu vstupní impedance. Rozdíly mezi matematickým modelem a měřeními jsou dány tím, že při měření dochází k nehomogenitám, odrazům a měrná indukčnost a svod nejsou přímo nulové, ale považujeme je za nulové při sestavování matematického modelu, protože nemáme možnost, jak je změřit.

Průběhy vstupních impedancí se nejvíce shodují při zátěžích 600 Ω , 400 Ω a u vedení naprázdno u kabelu SYKFY a u kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km a 1,075 km. U kabelu SYKFY dochází k přibližné shodě i při zátěži 150 Ω . U kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km a 1,66 km se vedení chová jako elektricky dlouhé už při nízkých frekvencích při všech zátěžích a průběhy vstupní impedance splývají s průběhem vlnové impedance.

Přínosem této bakalářské práce byla zajímavá práce na sestavování matematického modelu a jeho implementace do počítačového programu a plno nových poznatků, které mi tato práce dala.

Tato práce by se dala využít pro měření a zjištění hodnot vstupní impedance pro další typy kabelů, které by se mohly ověřit pomocí sestaveného modelu a programu.

Literatura

- [1] SZÉKELY, CSC., Doc. Ing. Juraj. *Teoretická Elektrotechnika I: Druhý díl*. Bratislava: ALFA - vydavateľství technické a ekonomické literatury, n.p., 1975, 216 s.
- [2] SVOBODA, Jaroslav. *Telekomunikační technika: Zprávy, signály, přenosová prostředí*. 1. vyd. Praha: Hüthig, 1998, 136 s. ISBN 80-901-9363-3.
- [3] SCHLITTER, Miloš. *Telekomunikační vedení*. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 978-800-1012-482.
- [4] KIJONKA, Jaromír. *Teorie obvodů II*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1489-6.
- [5] JFreeChart. *www.jfree.org* [online]. 2005-2011 [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: <http://www.jfree.org/jfreechart/>
- [6] Java: Model-View-Controller (MVC) Structure. *Java Programming Notes* [online]. 2004 [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: <http://www.leepoint.net/notes-java/GUI/structure/40mvc.html>
- [7] New to Java - New to java tutorial. *Rose India* [online]. [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: <http://www.roseindia.net/java/new-to-java.shtml>
- [8] What is Java Swing. *Rose India* [online]. [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: <http://www.roseindia.net/java/example/java/swing/JavaSwing.shtml>
- [9] Programovací jazyk Java. *Dioné | Nezávislý studentský informační server Západočeské univerzity v Plzni* [online]. [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: <http://v1.dione.zcu.cz/java/uvod.html>
- [10] Hyperbolic Functions. *Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource* [online]. 1999-2012 [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/HyperbolicFunctions.html>

Seznam příloh

Příloha A – Tabulky vypočtených hodnot sekundárních parametrů	I-II
Příloha B – Tabulky vypočtených hodnot hyperbolických funkcí	III-V
Příloha C – Tabulky vypočtené Z_I podle mat. modelu	VI-X
Příloha D – Tabulky vypočtené Z_I podle měření	XI-XII

Seznam příloh umístěných na CD

Příloha E – Grafy porovnávající vstupní impedanci matematického modelu a měření pod názvem – „grafy.zip“.

Příloha F – Složka se spustitelným programem na výpočet vstupní impedance pod názvem – „vstupni_impedance.zip“.

Příloha G – Zdrojové kódy z Netbeans IDE pod názvem – „aplikace_zdrojove_kody.zip“.

Příloha H – Uživatelská příručka pod názvem – „uzivatelska_prirucka.pdf“.

Příloha A

	Vedení D - délka 1,075 km				
	Vlnová impedance			Měrná míra přenosu	
f [kHz]	$ Z_0 $ [Ω]	$Re(Z_0)$ [Ω]	$Im(Z_0)$ [Ω]	$\alpha = [Np \cdot km^{-1}]$	$\beta = [rad \cdot km^{-1}]$
10	248	175	-175	0,456	0,456
25	200	142	-142	0,721	0,721
36	184	130	-130	0,866	0,866
68,5	159	112	-112	1,194	1,194
115,8	140	99	-99	1,553	1,553
152,3	132	93	-93	1,781	1,781
192,4	125	88	-88	2,001	2,001
226,9	120	85	-85	2,173	2,173
272,2	115	81	-81	2,380	2,380
311,3	112	79	-79	2,546	2,546
351,6	109	77	-77	2,705	2,705
391,2	106	75	-75	2,854	2,854
431,5	104	73	-73	2,997	2,997
472,8	101	72	-72	3,137	3,137
523,5	99	70	-70	3,301	3,301
574,2	97	69	-69	3,457	3,457
624,9	95	67	-67	3,607	3,607
675,6	93	66	-66	3,750	3,750
726,3	92	65	-65	3,888	3,888

	Vedení E - délka 1,378 km				
	Vlnová impedance			Měrná míra přenosu	
f [kHz]	$ Z_0 $ [Ω]	$Re(Z_0)$ [Ω]	$Im(Z_0)$ [Ω]	$\alpha = [Np \cdot km^{-1}]$	$\beta = [rad \cdot km^{-1}]$
10	248	175	-175	0,456	0,456
20	211	149	-149	0,645	0,645
32	189	134	-134	0,816	0,816
52	169	120	-120	1,040	1,040
90,3	149	105	-105	1,371	1,371
120,3	139	98	-98	1,583	1,583
155,1	131	93	-93	1,797	1,797
176,5	127	90	-90	1,917	1,917
217,7	121	86	-86	2,129	2,129
245,8	118	83	-83	2,262	2,262
280,6	114	81	-81	2,417	2,417
311,4	112	79	-79	2,546	2,546
400	105	75	-75	2,886	2,886
450	103	73	-73	3,061	3,061
500	100	71	-71	3,226	3,226
550	98	69	-69	3,384	3,384
600	96	68	-68	3,534	3,534
650	94	67	-67	3,679	3,679
700	93	65	-65	3,817	3,817

Tabulka 1: Vlnová impedance a měrná míra přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km a 1,378 km

f [kHz]	Vedení N - délka 1,66 km				
	Vlnová impedance			Měrná míra přenosu	
	Z_0 [Ω]	$Re(Z_0)$ [Ω]	$Im(Z_0)$ [Ω]	$\alpha = [Np \cdot km^{-1}]$	$\beta = [rad \cdot km^{-1}]$
10	248	175	-175	0,456	0,456
20	211	149	-149	0,645	0,645
39,8	180	127	-127	0,910	0,910
76,9	154	109	-109	1,265	1,265
97,47	146	103	-103	1,424	1,424
126,3	138	97	-97	1,622	1,622
147,7	133	94	-94	1,754	1,754
183,8	126	89	-89	1,956	1,956
250	118	83	-83	2,281	2,281
300	113	80	-80	2,499	2,499
350	109	77	-77	2,699	2,699
400	105	75	-75	2,886	2,886
450	103	73	-73	3,061	3,061
500	100	71	-71	3,226	3,226
550	98	69	-69	3,384	3,384
600	96	68	-68	3,534	3,534
650	94	67	-67	3,679	3,679
700	93	65	-65	3,817	3,817

Tabulka 2: Vlnová impedance a měrná míra přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km

Příloha B

Vedení G – délka 0,623 km								
f [kHz]	$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\coth(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\tanh(\bar{\gamma} \cdot l)$	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im
20	1,0819	0,0029	0,4129	0,0076	2,6194	-0,0411	0,3817	0,0060
30	1,1236	0,0044	0,5125	0,0097	2,1920	-0,0327	0,4561	0,0068
40	1,1659	0,0059	0,5996	0,0116	1,9440	-0,0276	0,5143	0,0073
64	1,2698	0,0098	0,7827	0,0159	1,6220	-0,0205	0,6164	0,0078
131,1	1,5778	0,0219	1,2206	0,0283	1,2924	-0,0120	0,7737	0,0072
204,26	1,9447	0,0374	1,6680	0,0436	1,1657	-0,0081	0,8578	0,0059
270,86	2,3082	0,0537	2,0805	0,0596	1,1093	-0,0060	0,9015	0,0048
345,9	2,7536	0,0749	2,5658	0,0804	1,0731	-0,0044	0,9319	0,0038
413,8	3,1911	0,0967	3,0305	0,1019	1,0529	-0,0035	0,9498	0,0031
489,5	3,7195	0,1244	3,5827	0,1292	1,0381	-0,0027	0,9633	0,0025
562,1	4,2687	0,1544	4,1501	0,1588	1,0285	-0,0022	0,9723	0,0020
637,9	4,8890	0,1897	4,7858	0,1938	1,0215	-0,0017	0,9790	0,0017
702,5	5,4574	0,2232	5,3651	0,2271	1,0171	-0,0014	0,9832	0,0014

Tabulka 3: Hyperbolické funkce míry přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 0,623 km

Vedení D - délka 1,075 km								
f [kHz]	$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\coth(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\tanh(\bar{\gamma} \cdot l)$	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im
10	1,1227	0,0044	0,5104	0,0096	2,1991	-0,0329	0,4546	0,0068
25	1,3160	0,0116	0,8556	0,0178	1,5378	-0,0185	0,6502	0,0078
36	1,4650	0,0174	1,0708	0,0238	1,3679	-0,0142	0,7310	0,0076
68,5	1,9431	0,0373	1,6661	0,0435	1,1660	-0,0081	0,8576	0,0059
115,8	2,7467	0,0746	2,5584	0,0800	1,0735	-0,0044	0,9315	0,0039
152,3	3,4624	0,1108	3,3150	0,1157	1,0444	-0,0030	0,9575	0,0028
192,4	4,3537	0,1592	4,2375	0,1636	1,0273	-0,0021	0,9734	0,0020
226,9	5,2159	0,2089	5,1193	0,2128	1,0188	-0,0016	0,9815	0,0015
272,2	6,4937	0,2868	6,4164	0,2902	1,0120	-0,0011	0,9881	0,0011
311,3	7,7411	0,3669	7,6764	0,3700	1,0084	-0,0008	0,9917	0,0008
351,6	9,1791	0,4636	9,1246	0,4663	1,0059	-0,0006	0,9941	0,0006
391,2	10,7552	0,5739	10,7087	0,5764	1,0043	-0,0005	0,9957	0,0005
431,5	12,5386	0,7036	12,4987	0,7058	1,0032	-0,0004	0,9968	0,0004
472,8	14,5692	0,8566	14,5350	0,8586	1,0023	-0,0003	0,9977	0,0003
523,5	17,3675	1,0753	17,3388	1,0771	1,0016	-0,0002	0,9984	0,0002
574,2	20,5335	1,3323	20,5093	1,3339	1,0012	-0,0002	0,9988	0,0002
624,9	24,1028	1,6322	24,0821	1,6336	1,0008	-0,0001	0,9992	0,0001
675,6	28,1135	1,9802	28,0958	1,9814	1,0006	-0,0001	0,9994	0,0001
726,3	32,6068	2,3820	32,5915	2,3831	1,0005	-0,0001	0,9995	0,0001

Tabulka 4: Hyperbolické funkce míry přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km

Vedení E - délka 1,378 km								
f [kHz]	$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\coth(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\tanh(\bar{\gamma} \cdot l)$	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im
10	1,2042	0,0074	0,6709	0,0132	1,7943	-0,0244	0,5572	0,0076
20	1,4219	0,0157	1,0109	0,0221	1,4062	-0,0152	0,7111	0,0077
32	1,7017	0,0270	1,3770	0,0334	1,2355	-0,0103	0,8093	0,0068
52	2,2157	0,0495	1,9774	0,0555	1,1204	-0,0064	0,8925	0,0051
90,3	3,3813	0,1066	3,2302	0,1115	1,0467	-0,0032	0,9554	0,0029
120,3	4,4796	0,1663	4,3667	0,1706	1,0258	-0,0020	0,9749	0,0019
155,1	5,9841	0,2551	5,9001	0,2588	1,0142	-0,0012	0,9860	0,0012
176,5	7,0449	0,3217	6,9737	0,3250	1,0102	-0,0009	0,9899	0,0009
217,7	9,4117	0,4796	9,3585	0,4823	1,0056	-0,0006	0,9944	0,0006
245,8	11,2965	0,6128	11,2523	0,6152	1,0039	-0,0004	0,9961	0,0004
280,6	13,9708	0,8109	13,9351	0,8130	1,0025	-0,0003	0,9975	0,0003
311,4	16,6836	1,0211	16,6537	1,0229	1,0018	-0,0002	0,9982	0,0002
400	26,6097	1,8485	26,5910	1,8498	1,0007	-0,0001	0,9993	0,0001
450	33,8539	2,4955	33,8392	2,4966	1,0004	-0,0001	0,9996	0,0001
500	42,5134	3,3045	42,5017	3,3054	1,0003	0,0000	0,9997	0,0000
550	52,7976	4,3055	52,7882	4,3063	1,0002	0,0000	0,9998	0,0000
600	64,9404	5,5327	64,9328	5,5333	1,0001	0,0000	0,9999	0,0000
650	79,2029	7,0250	79,1967	7,0255	1,0001	0,0000	0,9999	0,0000
700	95,8755	8,8268	95,8703	8,8273	1,0001	0,0000	0,9999	0,0000

Tabulka 5: Hyperbolické funkce míry přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km

Vedení N - délka 1,66 km								
f [kHz]	$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\coth(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\tanh(\bar{\gamma} \cdot l)$	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im
10	1,3007	0,0110	0,8319	0,0172	1,5632	-0,0191	0,6396	0,0078
20	1,6304	0,0241	1,2878	0,0305	1,2657	-0,0113	0,7900	0,0070
39,8	2,3752	0,0568	2,1546	0,0627	1,1022	-0,0057	0,9072	0,0047
76,9	4,1429	0,1475	4,0206	0,1519	1,0303	-0,0023	0,9705	0,0021
97,47	5,3625	0,2176	5,2686	0,2214	1,0178	-0,0015	0,9825	0,0014
126,3	7,4042	0,3449	7,3365	0,3481	1,0092	-0,0009	0,9909	0,0009
147,7	9,2014	0,4651	9,1471	0,4679	1,0059	-0,0006	0,9941	0,0006
183,8	12,8571	0,7272	12,8183	0,7294	1,0030	-0,0003	0,9970	0,0003
250	22,0255	1,4564	22,0029	1,4579	1,0010	-0,0001	0,9990	0,0001
300	31,5936	2,2904	31,5778	2,2915	1,0005	-0,0001	0,9995	0,0001
350	44,0262	3,4493	44,0149	3,4501	1,0003	0,0000	0,9997	0,0000
400	59,9595	5,0240	59,9512	5,0247	1,0001	0,0000	0,9999	0,0000
450	80,1403	7,1247	80,1341	7,1253	1,0001	0,0000	0,9999	0,0000
500	105,4418	9,8844	105,4371	9,8849	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
550	136,8814	13,4621	136,8778	13,4625	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
600	175,6405	18,0476	175,6377	18,0479	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
650	223,0862	23,8660	223,0839	23,8662	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
700	280,7959	31,1830	280,7941	31,1832	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000

Tabulka 6: Hyperbolické funkce míry přenosu kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km

kabel SYKFY - délka 0,27 km								
f [kHz]	$\cosh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\coth(\bar{\gamma} \cdot l)$		$\tanh(\bar{\gamma} \cdot l)$	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im
50	1,0922	0,0033	0,4392	0,0081	2,4859	-0,0385	0,4022	0,0062
102,8	1,1926	0,0069	0,6499	0,0127	1,8346	-0,0252	0,5450	0,0075
230,9	1,4494	0,0168	1,0494	0,0232	1,3810	-0,0145	0,7241	0,0076
372,9	1,7571	0,0294	1,4449	0,0357	1,2158	-0,0097	0,8224	0,0066
513	2,0854	0,0436	1,8302	0,0497	1,1393	-0,0071	0,8777	0,0055
699,6	2,5630	0,0657	2,3601	0,0713	1,0858	-0,0050	0,9209	0,0042

Tabulka 7: Hyperbolické funkce míry přenosu kabelu SYKFY délky 0,27 km

Příloha C

Vedení D - délka 1,075 km															
	$Z = \infty$ (naprázdno)			$Z = 600 \Omega$			$Z = 400 \Omega$			$Z = 150 \Omega$			$Z = 0$ (nkrátko)		
f	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{I0} $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{Ik} $
[kHz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
10	379,856	-391,377	545	304,768	-180,683	354	267,724	-145,240	305	177,993	-95,386	202	80,911	-78,529	113
25	215,391	-220,631	308	201,043	-157,250	255	190,367	-140,479	237	153,555	-107,868	188	93,288	-91,072	130
36	176,351	-180,040	252	169,579	-143,536	222	163,833	-132,663	211	141,131	-108,895	178	96,211	-94,240	135
68,5	129,932	-131,742	185	128,393	-119,617	175	126,774	-115,444	171	118,857	-104,614	158	96,895	-95,565	136
115,8	106,199	-107,082	151	105,829	-102,881	148	105,353	-101,322	146	102,649	-96,830	141	92,923	-92,157	131
152,3	97,075	-97,641	138	96,920	-95,402	136	96,689	-94,547	135	95,281	-91,972	132	89,523	-89,004	126
192,4	90,534	-90,902	128	90,467	-89,659	127	90,350	-89,174	127	89,588	-87,665	125	86,126	-85,777	122
226,9	86,454	-86,718	122	86,420	-85,923	122	86,350	-85,609	122	85,875	-84,611	121	83,546	-83,292	118
272,2	82,363	-82,539	117	82,349	-82,071	116	82,311	-81,884	116	82,039	-81,275	115	80,594	-80,422	114
311,3	79,575	-79,702	113	79,568	-79,394	112	79,545	-79,269	112	79,370	-78,858	112	78,381	-78,256	111
351,6	77,186	-77,279	109	77,184	-77,072	109	77,169	-76,987	109	77,054	-76,706	109	76,369	-76,277	108
391,2	75,187	-75,257	106	75,186	-75,113	106	75,177	-75,054	106	75,099	-74,855	106	74,612	-74,543	105
431,5	73,420	-73,472	104	73,420	-73,371	104	73,414	-73,330	104	73,361	-73,187	104	73,009	-72,957	103
472,8	71,826	-71,866	102	71,827	-71,794	102	71,822	-71,764	102	71,785	-71,662	101	71,530	-71,491	101
523,5	70,105	-70,133	99	70,106	-70,085	99	70,103	-70,065	99	70,079	-69,995	99	69,903	-69,875	99
574,2	68,588	-68,609	97	68,589	-68,576	97	68,588	-68,563	97	68,572	-68,514	97	68,449	-68,428	97
624,9	67,236	-67,252	95	67,237	-67,228	95	67,236	-67,219	95	67,225	-67,184	95	67,137	-67,122	95
675,6	66,017	-66,029	93	66,018	-66,012	93	66,017	-66,005	93	66,009	-65,981	93	65,946	-65,935	93
726,3	64,909	-64,918	92	64,909	-64,906	92	64,909	-64,901	92	64,904	-64,883	92	64,858	-64,849	92

Tabulka 8: Výpočet vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km

Vedení E - délka 1,378 km															
	$Z = \infty$ (naprázdno)			$Z = 600 \Omega$			$Z = 400 \Omega$			$Z = 150 \Omega$			$Z = 0$ (nakrátko)		
f	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{I0} $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_0 $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{Ik} $
[kHz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
10	310,356	-318,901	445	268,850	-183,555	326	244,887	-156,207	290	179,504	-113,147	212	99,038	-96,384	138
20	207,682	-212,213	297	196,630	-161,182	254	188,160	-147,345	239	158,171	-119,798	198	107,311	-105,020	150
32	164,028	-166,798	234	160,026	-142,972	215	156,423	-135,589	207	141,408	-118,718	185	109,258	-107,444	153
52	133,251	-134,780	190	132,021	-125,048	182	130,720	-121,726	179	124,429	-113,199	168	107,374	-106,156	151
90,3	109,822	-110,486	156	109,570	-107,545	154	109,237	-106,463	153	107,366	-103,388	149	100,853	-100,247	142
120,3	100,808	-101,200	143	100,715	-99,769	142	100,568	-99,228	141	99,679	-97,620	140	96,179	-95,806	136
155,1	94,032	-94,261	133	93,998	-93,557	133	93,933	-93,284	132	93,508	-92,447	131	91,644	-91,420	129
176,5	90,918	-91,089	129	90,900	-90,611	128	90,858	-90,424	128	90,576	-89,842	128	89,265	-89,098	126
217,7	86,243	-86,343	122	86,237	-86,100	122	86,218	-86,004	122	86,079	-85,696	121	85,375	-85,277	121
245,8	83,715	-83,787	118	83,713	-83,627	118	83,701	-83,564	118	83,612	-83,357	118	83,136	-83,065	118
280,6	81,083	-81,131	115	81,083	-81,033	115	81,076	-80,994	115	81,023	-80,864	114	80,720	-80,672	114
311,4	79,093	-79,128	112	79,094	-79,062	112	79,089	-79,036	112	79,055	-78,947	112	78,847	-78,812	111
400	74,558	-74,572	105	74,559	-74,549	105	74,557	-74,540	105	74,546	-74,507	105	74,469	-74,454	105
450	72,531	-72,540	103	72,532	-72,527	103	72,531	-72,521	103	72,525	-72,502	103	72,478	-72,469	102
500	70,770	-70,776	100	70,770	-70,768	100	70,770	-70,765	100	70,766	-70,753	100	70,738	-70,732	100
550	69,217	-69,221	98	69,217	-69,216	98	69,217	-69,213	98	69,215	-69,206	98	69,196	-69,192	98
600	67,830	-67,833	96	67,830	-67,829	96	67,830	-67,828	96	67,829	-67,823	96	67,817	-67,814	96
650	66,580	-66,582	94	66,580	-66,580	94	66,580	-66,579	94	66,579	-66,576	94	66,571	-66,570	94
700	65,444	-65,445	93	65,444	-65,443	93	65,444	-65,443	93	65,443	-65,441	93	65,438	-65,437	93

Tabulka 9: Výpočet vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km

Vedení N - délka 1,66 km															
	$Z = \infty$ (naprázdno)			$Z = 600 \Omega$			$Z = 400 \Omega$			$Z = 150 \Omega$			$Z = 0$ (nakrátko)		
f	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{I0} $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_0 $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{Ik} $
[kHz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
10	270,765	-277,461	388	245,107	-183,707	306	228,701	-162,539	281	179,901	-126,437	220	113,527	-110,787	159
20	187,298	-190,662	267	181,025	-158,092	240	175,836	-148,686	230	156,069	-128,748	202	118,999	-116,899	167
39,8	139,562	-141,006	198	138,359	-131,823	191	137,109	-128,746	188	131,230	-121,023	179	116,061	-114,872	163
76,9	112,306	-112,800	159	112,139	-110,763	158	111,910	-110,018	157	110,630	-107,916	155	106,254	-105,789	150
97,47	105,077	-105,383	149	105,007	-104,307	148	104,896	-103,904	148	104,233	-102,728	146	101,737	-101,441	144
126,3	98,171	-98,340	139	98,148	-97,842	139	98,102	-97,651	138	97,804	-97,076	138	96,558	-96,392	136
147,7	94,387	-94,501	134	94,377	-94,201	133	94,351	-94,085	133	94,176	-93,727	133	93,393	-93,281	132
183,8	89,483	-89,544	127	89,481	-89,405	126	89,470	-89,350	126	89,391	-89,177	126	89,007	-88,947	126
250	83,171	-83,194	118	83,172	-83,152	118	83,169	-83,136	118	83,147	-83,081	118	83,024	-83,002	117
300	79,690	-79,701	113	79,690	-79,683	113	79,689	-79,675	113	79,680	-79,650	113	79,623	-79,611	113
350	76,874	-76,880	109	76,874	-76,871	109	76,874	-76,868	109	76,870	-76,855	109	76,841	-76,835	109
400	74,522	-74,525	105	74,522	-74,521	105	74,522	-74,519	105	74,520	-74,512	105	74,505	-74,501	105
450	72,509	-72,511	103	72,509	-72,509	103	72,509	-72,508	103	72,508	-72,504	103	72,500	-72,498	103
500	70,756	-70,758	100	70,756	-70,756	100	70,756	-70,756	100	70,756	-70,754	100	70,751	-70,750	100
550	69,208	-69,209	98	69,208	-69,208	98	69,208	-69,208	98	69,208	-69,206	98	69,205	-69,204	98
600	67,824	-67,825	96	67,824	-67,824	96	67,824	-67,824	96	67,824	-67,823	96	67,823	-67,822	96
650	66,576	-66,576	94	66,576	-66,576	94	66,576	-66,576	94	66,576	-66,576	94	66,575	-66,575	94
700	65,441	-65,441	93	65,441	-65,441	93	65,441	-65,441	93	65,441	-65,441	93	65,440	-65,440	93

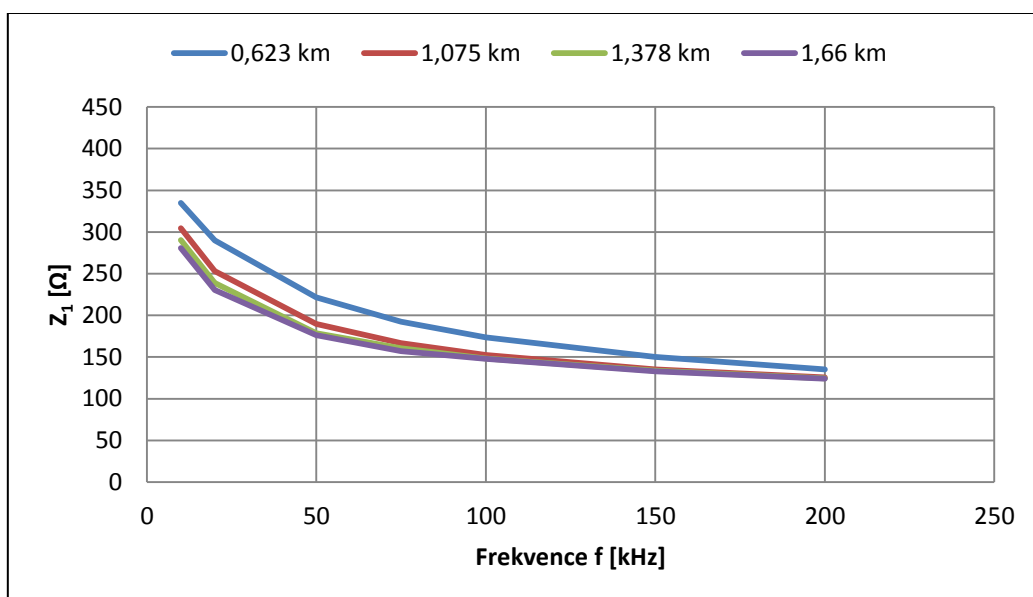
Tabulka 10: Výpočet vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km

kabel SYKFY - délka 0,27 km															
	$Z = \infty$ (naprázdno)			$Z = 600 \Omega$			$Z = 400 \Omega$			$Z = 150 \Omega$			$Z = 0$ (nakrátko)		
f	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{I0} $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_I $	$Re(Z_I)$	$Im(Z_I)$	$ Z_{Ik} $
[kHz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
50	143,359	-147,875	206	135,913	-101,552	170	129,041	-86,372	155	98,245	-49,482	110	23,924	-23,194	33
102,8	99,402	-102,176	143	97,265	-82,076	127	94,863	-74,517	121	81,241	-52,373	97	30,353	-29,529	42
230,9	69,854	-71,338	100	69,418	-64,308	95	68,793	-61,411	92	64,387	-51,553	82	37,403	-36,626	52
372,9	59,081	-60,034	84	58,938	-56,566	82	58,682	-55,088	80	56,672	-49,752	75	40,611	-39,966	57
513	53,908	-54,585	77	53,848	-52,524	75	53,715	-51,632	75	52,589	-48,314	71	42,053	-41,532	59
699,6	50,064	-50,526	71	50,043	-49,346	70	49,976	-48,829	70	49,370	-46,861	68	42,851	-42,459	60

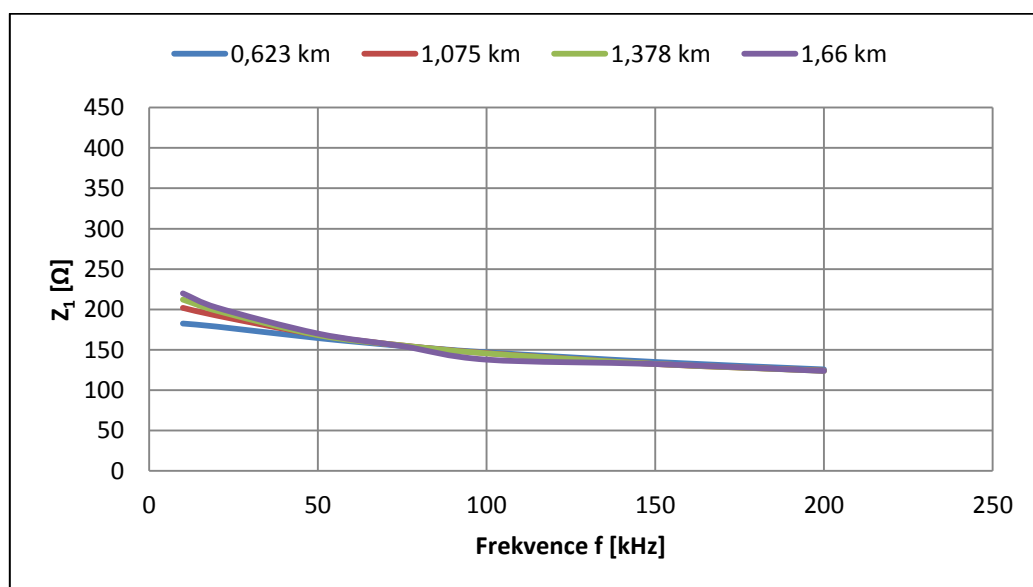
Tabulka 11: Výpočet vstupní impedance kabelu SYKFY délky 0,27 km

f [kHz]	Z_1 ($Z = 400 \Omega$)				Z_1 ($Z = 150 \Omega$)			
	Vedení G	Vedení D	Vedení E	Vedení N	Vedení G	Vedení D	Vedení E	Vedení N
10	335	305	290	281	183	202	212	220
20	290	253	239	230	179	192	198	202
50	221	190	179	176	165	168	168	170
75	192	167	161	157	155	155	155	155
100	174	153	148	148	147	146	146	138
150	150	135	134	133	135	132	133	132
200	135	126	124	124	126	124	124	124

Tabulka 12: Hodnoty vstupní impedance kabelu TCEPKPFLE v závislosti na délce l



Obr. 1: Průběh vstupní impedance v závislosti na délce l při zátěži $Z = 400 \Omega$



Obr. 2: Průběh vstupní impedance v závislosti na délce l při zátěži $Z = 150$

Příloha D

Vedení D – délka 1,075 km											
R_i [Ω]	600										
Z [Ω]	∞ (naprázdno)		600		400		150		0 (nakrátko)		
f	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	Z_0
[kHz]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[Ω]
10	-2,5	360	-2,3	374	-3	329	-2,7	347	-3,6	296	326
25	-8,1	147	-6,9	175	-7	173	-5,5	217	-4,1	272	200
36	-8,5	139	-7,9	151	-8	149	-7	173	-4,8	242	183
68,5	-6,8	178	-7,3	165	-7,8	153	-8,1	147	-9,4	122	147
115,8	-9,7	117	-9,4	122	-9,4	122	-8,8	133	-7,8	153	134
152,3	-8	149	-8,3	143	-8,7	135	-8,8	133	-9,7	117	132
192,4	-9,9	114	-9,8	116	-9,8	116	-9,3	124	-8,6	137	125
226,9	-8,9	131	-9,2	126	-9,5	121	-9,6	119	-10,2	110	120
272,2	-10,4	107	-10,2	110	-10,4	107	-10	113	-9,5	121	113
311,3	-9,7	117	-10	113	-10	113	-10	113	-10,5	105	111
351,6	-10,4	107	-10,3	108	-10,5	105	-10,1	111	-9,7	117	112
391,2	-9,7	117	-9,8	116	-10	113	-10,2	110	-10,6	104	110
431,5	-10,5	105	-10,3	108	-10,5	105	-10,2	110	-10,3	108	107
472,8	-10,1	111	-10,2	110	-10,4	107	-10,3	108	-10,6	104	107
523,5	-10,9	100	-10,9	100	-11	98	-10,9	100	-10,8	101	100

Tabulka 13: Stanovení vstupní a vlnové impedance z měření kabelu TCEPKPFLE délky 1,075 km

Vedení E – délka 1,378 km											
R_i [Ω]	600										
Z [Ω]	∞ (naprázdno)		600		400		150		0 (nakrátko)		
f	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	Z_0
[kHz]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[Ω]
10	-3,8	286	-2,8	341	-3,2	317	-2,5	360	-2,8	341	312
20	-7,1	170	-6,2	195	-6,5	186	-5,1	231	-4,1	272	215
32	-7,3	165	-7,3	165	-7,5	160	-6,9	175	-5,9	204	183
52	-6,8	178	-7,3	165	-7,6	158	-7,8	153	-8,5	139	157
90,3	-9,1	128	-8,8	133	-9	129	-8,5	139	-7,9	151	139
120,3	-8,2	145	-8,4	141	-8,7	135	-8,8	133	-9,4	122	133
155,1	-9,4	122	-9,2	126	-9,4	122	-9	129	-8,7	135	129
176,5	-8,8	133	-9	129	-9,2	126	-9,2	126	-9,6	119	126
217,7	-9,8	116	-9,8	116	-9,9	114	-9,6	119	-9,3	124	120
245,8	-9,4	122	-9,5	121	-10	113	-9,7	117	-10	113	117
280,6	-10,3	108	-10,3	108	-10,4	107	-10,1	111	-9,9	114	111
311,4	-10	113	-10,1	111	-10,4	107	-10,3	108	-10,4	107	110

Tabulka 14: Stanovení vstupní a vlnové impedance z měření kabelu TCEPKPFLE délky 1,378 km

Vedení N – délka 1,66 km											
R_i [Ω]	600										
Z [Ω]	∞ (naprázdno)		600		400		150		0 (nakrátko)		
f	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	Z_0
[kHz]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[Ω]
10	-4,4	259	-3,2	317	-3,7	291	-2,5	360	-2,4	367	308
20	-6,3	192	-6	201	-6,5	186	-5,3	224	-4,3	263	225
40	-6,5	186	-6,9	175	-7,5	160	-7,2	168	-7,6	158	171
77	-8,5	139	-8,4	141	-8,6	137	-8,3	143	-7,9	151	145
97	-8,2	145	-8,3	143	-8,6	137	-8,5	139	-8,8	133	139
126	-9	129	-8,9	131	-9,2	126	-8,8	133	-8,5	139	134
148	-8,5	139	-8,7	135	-9	129	-8,8	133	-9,1	128	133
184	-9,2	126	-9,2	126	-9,4	122	-9,1	128	-9	129	128

Tabulka 15: Stanovení vstupní a vlnové impedance z měření kabelu TCEPKPFLE délky 1,66 km

kabel SYKFY – délka 0,27 km											
R_i [Ω]	600										
Z [Ω]	∞ (naprázdno)		600		400		150		0 (nakrátko)		
f	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	L_1	Z_1	Z_0
[kHz]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[dBu]	[Ω]	[Ω]
50	-13	76	-13	76	-13,1	75	-12,3	83	-12,6	80	78
102,8	-18,1	40	-16,9	46	-16,2	50	-14,2	65	-7,1	170	82
230,9	-10,4	107	-11	98	-11,3	95	-12,4	82	-16	52	74
372,9	-15	59	-14,8	60	-14,7	61	-14,2	65	-12,3	83	70
513	-13,1	75	-13,4	72	-13,5	71	-13,3	73	-14,8	60	67
699,6	-14,8	60	-14,8	60	-14,7	61	-14,5	62	-14,2	65	62

Tabulka 16: Stanovení vstupní a vlnové impedance z měření kabelu SYKFY délky 0,27 km